



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة بغداد / كلية العلوم  
قسم الكيمياء

# الدينامية الحرارية

## THERMODYNAMICS

تأليف

الاستاذ  
الدكتور سلمان رشيد سلمان

الاستاذ  
الدكتور حمزة عبد الحسين

الاستاذ  
الدكتور باسل هاشم الصدر

الاستاذ  
الدكتور خالد عيسى العاني

## بسم الله الرحمن الرحيم

### المقدمة :

الحمد لله والصلاة والسلام على سيدنا محمد ( ص ) وعلى آله وصحبه  
اجمعين . مما لاشك فيه ان اللغة العربية لغة حية قادرة على استيعاب ومواكبة التطور  
العلمي الحديث والاسهام الفاعل في بناء الحضارة الانسانية فضلاً عن كونها ركناً  
اساساً من مقومات الشخصية العربية الفذة .

لقد قمنا وبعون الله بتأليف كتاب في الدينامية الحرارية  
(Thermodynamics) ليكون كتاباً منهجياً في مادة الكيمياء الفيزيائية لطلبة  
الكيمياء في كلية العلوم ووفق المفردات المقررة . وقد اعتمدنا، قدر الامكان، عند  
تأليفنا هذا الكتاب المصطلحات العلمية المعربة والمقرة من قبل المجمع العلمي  
العراقي .

هذا ونود تقديم الكتاب الى طلبتنا والى الدراسين لعلم الكيمياء . آمليين  
ان يكون لهم عوناً لتخطي مسيرتهم العلمية، والى الزملاء الكيميائيين آمليين ان يكون  
لهم خير مصدراً في هذا الحقل . ونرجو ان نكون قد اضفنا هذا الكتاب الى مكتبتنا  
العربية، آمليين اننا قد وفقنا في ذلك وادينا واجباً وطنياً . وبهذه المناسبة نشكر زميلينا  
الدكتور محسن البيرماني الذي بذل جهداً في مراجعة هذا الكتاب ولاقتراحاته  
وملاحظاته البناءة والتي ادت الى اظهاره بشكلة الحالي .  
ومن الله التوفيق .

المؤلفون

## الفهرست

الصفحة

الموضوع

الفصل

..... الفصل الاول : الدينامية الحرارية

..... 1-1 طبيعة الدينامية الحرارية

..... 2-1 بعض الاصطلاحات الاساسية والتعاريف

..... 3-1 حالة المنظومة وتغيرات الحالة

..... 4-1 انواع الصفات الفيزيائية للمنظومة

..... 5-1 عمليات الدينامية الحرارية المختلفة

..... 6-1 درجات الحرارة وقانون الدينامية الحراري

..... الفصل الثاني : القانون الاول للدينامية الحراري

..... 1-2 الشغل

..... 2-2 الشغل نتيجة تغير الحجم

..... 3-2 حسابات الشغل المنجز تحت ظروف مختلفة

..... 4-2 الشغل المنجز عند ضغط ثابت

..... 5-2 الشغل المنجز في عملية تمدد او تقلص مقابل ضغط متغير

..... 6-2 الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز في ظروف رجوعية في درجة حرارة ثابتة

..... 7-2 الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز بعملية لارجوعية في درجة حرارة ثابتة

..... 8-2 الشغل المنجز في العمليات الدائرية

..... 9-2 الحرارة

..... 10-2 حفظ الطاقة وقانون الدينامية الحراري الاول

..... 11-2 الطاقة الداخلية لغاز مثالي

..... 12-2 الطاقة الداخلية لعملية تحت حجم ثابت

..... 13-2 الانتالبية

..... 14-2 السعة الحرارية

- 15-2 اعتماد السعة الحرارية على درجة الحرارة.....
- 16-2 تطبيقات اخرى لقانون الدينامية الحراري الاول على الغازات المثالية.....
- 17-2 التمدد الرجوعي الكظيم.....
- اسئلة الفصل الثاني.....

### الفصل الثالث : الكيمياء الحرارية.....

- 1-3 التغيرات الحرارية في التفاعلات الكيميائية.....
- 2-3 المعادلات الكيميائية الحرارية.....
- 3-3 الحالات القياس.....
- 4-3 انثالية التكوين القياس.....
- 5-3 قانون هيس للجمع الحراري الثابت.....
- 6-3 انثالية الاحتراق القياس.....
- 7-3 انثالية المحلول.....
- 8-3 انثالية التعادل.....
- 9-3 انثالية الاصرة.....
- 10-3 تأثير درجة الحرارة.....
- اسئلة الفصل الثالث.....

### الفصل الرابع : القانون الثاني للدينامية الحراري.....

- 1-4 الانتروبي.....
- 2-4 القانون الثاني للدينامية الحرارية.....
- 3-4 حساب الانتروبي للغاز المثالي.....
- 4-4 تغييرات الانتروبي للعمليات اللارجوعية.....
- 5-4 انتروبي مزج الغازات المثالية.....
- 6-4 معايير التوازن الكيميائي.....
- 7-4 الطاقة الحرة لكبس معيار للتوازن.....
- 8-4 المعادلات الاساس للمنظومات المغلقة.....
- 9-4 تأثير درجة الحرارة على طاقة كبس الحرة بثبات الضغط.....
- 10-4 تأثير الضغط على طاقة كبس الحرة.....



11-4	اعتماد الانتروبي على متغيرات المجموعة.....
12-4	المعادلة الدينامية الحرارية للحالة.....
13-4	المعادلة الأساس للمنظومات المفتوحة.....
14-4	الجهد الكيماوي.....
15-4	الكميات المولارية الجزئية.....
16-4	القانون الثالث للدينامية الحرارية.....
	مسائل الفصل الرابع.....

#### الفصل الخامس : حالات المادة.....

1-5	حالات المادة.....
2-5	معادلة الحالة.....
3-5	تعيين ثابت الغاز.....
5-5	الغازات الحقيقية.....
6-5	معادلة فان دير فالفز.....
7-5	معادلة فان دير فالفز والنقطة الحرجة.....
8-5	معادلة كلايرون.....
9-5	معادلة كلاوسيوس — كلايرون.....
10-5	تطبيقات وامثلة على معادلة كلاوسيوس — كلايرون.....
11-5	انتروبي التبخر.....
	مسائل الفصل الخامس.....

#### الفصل السادس : السوائل.....

1-6	مقدمة.....
2-6	الضغط البخاري للسوائل.....
3-6	طرق تعيين ضغط بخار السائل.....
4-6	طريقة قياس ضغط البخار للسائل.....
5-6	العوامل التي يعتمد عليها ضغط بخار السوائل.....
6-6	نظرية السوائل.....

7-6	تركيب السوائل والقوى الداخلية.....
8-6	الحجم الحر للسوائل.....
9-6	السعة الحرارية للسوائل.....
10-6	لزوجة السوائل.....
11-6	طرق قياس لزوجة السوائل.....
12-6	تأثير درجة الحرارة على لزوجة السوائل.....
13-6	تطبيقات اللزوجة في إيجاد الوزن الجزيئي للجزيئات الكبيرة.....
14-6	الشد السطحي.....
15-6	طريقة ارتفاع السائل في الانابيب الشعرية لقياس الشد السطحي.....
	اسئلة الفصل السادس.....

## الفصل السابع : الحالة الصلبة.....

1-7	الحالة الصلبة.....
2-7	خواص المادة الصلبة.....
3-7	شبكة البلورة.....
4-7	اشكال البلورات.....
5-7	المنظومات البلورية.....
6-7	السعة الحرارية للمواد الصلبة.....
	اسئلة الفصل السابع.....

## الفصل الثامن : اتزانات الاطوار.....

1-8	اتزانات الاطوار.....
2-8	اشتقاق قانون الطور.....
3-8	مخطط الطور لمنظومة من مكونة واحدة.....

## الفصل التاسع : التوازن الكيميائي.....

1-9	التوازن الكيميائي.....
2-9	الدينامية الحرارية للغازات المثالية.....

- 3-9 الانتروبي والتوازن.....
- 4-9 حالة التوازن الكيميائي.....
- 5-9 تفسير طاقة كبس الحرارة.....
- 6-9 اعتماد الطاقة الحرة على الضغط ودرجة الحرارة.....
- 7-9 حساب التغير في طاقة كبس الحرارة ( $\Delta G$ ).....
- 8-9 الدينامية الحرارية لخليط غازات مثالية.....
- 9-9 الفعالية والفيوكاستي.....
- 10-9 الحالة القياسية للغازات الحقيقية.....
- 11-9 اشتقاق ثابت التوازن للغازات المثالية.....
- 12-9 دالة طاقة كبس الحرارة.....
- 13-9 اعتماد طاقة كبس الحرارة على مدى التفاعل.....
- 14-9 ثابت التوازن للغازات الحقيقية.....
- 15-9 العلاقة ما بين  $K_p$  و  $K_x$  و  $K_C$ .....
- 16-9 طريقة تعيين ثابت التوازن ( $K$ ).....
- اسئلة الفصل التاسع.....

## الفصل العاشر : المحاليل.....

- 1-10 المحاليل.....
- 2-10 قانون راؤولت والمحلل المثالي.....
- 3-10 الكميات المولارية جزئية.....
- 4-10 المحلول المثالي الذي يحتوي على مادتين طيارة.....
- 5-10 قانون هنري.....
- 6-10 المحاليل غير المثالية.....
- 7-10 الدينامية الحرارية للمحاليل المثالية.....
- 8-10 انتالبية المحلول المثالي.....
- 9-10 انتروبية المحلول المثالي.....
- 10-10 الطاقة الحرة للمحلل المثالي.....
- 11-10 الصفات الدينامية الحرارية للمحلل الحقيقي.....

12-10	الطاقات الحرة لمكونات المحلول — المذيب.....
13-10	الطاقات الحرة لمكونات المحلول — المذاب.....
14-10	فعالية المذاب من صفات المذيب.....
15-10	الخواص المترابطة.....
16-10	التنافذ والضغط التنافذي.....
	اسئلة الفصل العاشر.....

	الفصل الحادي عشر : الدينامية الحرارية الاحصائي.....
1-11	الدينامية الحرارية الاحصائي.....
2-11	التوزيع الاكثر احتمالاً.....
3-11	دالة التجزئة.....
4-11	طاقة المنظومة.....
5-11	فصل دوال التجزئة.....
6-11	الانتروبي وطاقة كبس الحرة.....
7-11	الطاقة والسعة الحرارية.....
8-11	تأثير مستوى الطاقة الصفر.....
9-11	فصل دوال التجزئة.....
10-11	الطريقة النظرية لحساب ثابت التوازن.....
	المصادر.....
	المصطلحات العلمية.....
	الملاحق.....

# الفصل الأول

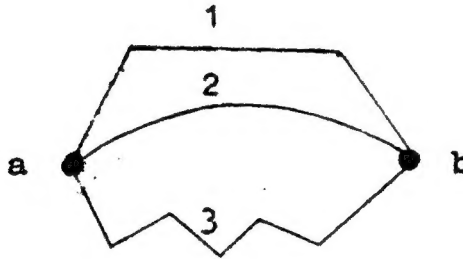
## الدينامية الحرارية (Thermodynamics)

### 1-1 طبيعة الدينامية الحرارية (Nature of Thermodynamics)

الدينامية الحرارية هي فرع من فروع الفيزياء يبحث في تحول الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية ( شغل ) وبالعكس. وبما ان جميع التحولات الفيزيائية والكيميائية تصاحبها تغيرات طاقة، لذا فإنه من الممكن، كذلك، تعريف الدينامية الحرارية بأنه ذلك العلم الذي يكون محور دراسته التغيرات الطاقية التي تصاحب هذه التحولات الفيزيائية والكيميائية. والدينامية الحرارية علم عام في تطبيقاته بسبب قوانينه ( القانون الصفري، القانون الاول، القانون الثاني، والقانون الثالث ) التي تتحكم بالتحويلات التي تحدث بين الطاقة الحرارية وباقي اشكال الطاقة.

من الممكن اعتمادا على هذه القوانين معالجة العديد من المسائل المختلفة، فمثلا يمكن التكهن عن امكانية حدوث تغيرات كيميائية أو فيزيائية أم لا. الا انه من المهم أن نتذكر ان الاستنتاج الوحيد التي يمكن ان توفره دراسة الدينامية الحرارية لتفاعل كيميائي هو امكانية او استحالة حدوث التفاعل اضافة الى تحديد المواد المتفاعلة والنواتج التي تعين موقع التوازن (Equilibrium) للتفاعل تحت ظروف معينة. في حين ان الاجابة عن الزمن المستغرق لاتمام التفاعل او الزمن اللازم للوصول الى حالة التوازن او عن آلية (Mechanism) التفاعل لايمكن الحصول عليها من دراسة الدينامية الحرارية للتفاعل. لكن الدراسة الحركية للتفاعل يمكن ان توفر الاجوبة المناسبة لمثل هذه الاسئلة.

يظهر مما تقدم ان اهتمام ودراسة الدينامية الحرارية، لتغير كيميائي أو فيزيائي، ينصب على الحالتين الابتدائية والنهائية للمادة، المواد المتفاعلة والنااتجة في حالة تفاعل كيميائي، بغض النظر عن الخطوات التي تتخلل عملية التحول بين هاتين الحالتين أو الزمن المستغرق. ولتوضيح ذلك نأخذ، على سبيل المثال، تغيراً، فيزيائياً أو كيميائياً، تعانيه مادة معينة لنطلق عليها المنظومة (System) فيحولها من حالتها الابتدائية (a) الى حالتها النهائية (b). يمكن لهذا التحول ان يتم وفق أي من المسالك (1) أو (2) أو (3) المبينة في الشكل (1-1). يلاحظ من الشكل (1-1) ان التحول من (a) الى (b) يمكن ان يتم بثلاث خطوات اذا اتبع المسلك (1) أو بخطوة واحدة وفق المسلك (2) أو بست خطوات اذا كان المسلك (3) هو المتبع. في الحقيقة، تبعاً للدينامية الحرارية، ان التغير الذي يحصل في خواص الدينامية الحرارية للمنظومة عند تحولها من حالتها الابتدائية (a) الى حالتها النهائية (b) يكون نفسه بغض النظر عن المسلك الذي سلكته المنظومة لاجل انجاز ذلك التحول.



الشكل (1-1)

من الامور الاخرى التي يجب الاطلاع عليها ومعرفتها هي ان تعامل الدينامية الحرارية يكون فقط مع الصفات العيانية (Macroscopic properties) للمادة، أي الصفات الواضحة للعيان والتي يمكن قياسها عملياً كدرجة الحرارة والضغط والحجم والمكونات وثابت التوازن والاذابة وغيرها. ومهمة الدينامية الحرارية هي توفير العلاقات بين هذه الصفات العيانية بصورة منتظمة ومنهجية يمكن اشتقاقها من

قوانينه وبذا تبسط عملية فهم الظواهر الفيزيائية بدلالة صفات كيميائية. هذا وان الدينامية الحرارية، لاتأخذ بعين الاعتبار الطبيعة الجزيئية للمادة، لذلك نرى ان معظم المناقشات بصورة عامة تخلو من استخدام اية نظرية من نظريات التركيب الجزيئي أو افتراض حول طبيعة الجزيئات للمادة. ولو انه يستعان في بعض الاحيان بذلك لاجل تبسيط فهم الظواهر الفيزيائية بدلالة الصفات الجزيئية.

## 2-1 بعض الاصطلاحات الاساسية والتعاريف Some basic convensions and definitions

**منظومة الدينامية الحرارية (Thermodynamic System):** تعني منظومة الدينامية الحرارية ذلك الجزء من الكون، الخاضع للدراسة التجريبية، والمكون عادة من كمية او كميات محددة عادة او مواد معينة، وتفصله عن باقي اجزاء الكون [ التي يطلق عليها المحيط (Surroundings) ] حدود (Boundaries) قد تكون حقيقية أو وهمية يتم عبرها انتقال الطاقة أو اختفاء الشغل. في اكثر الحالات يمكن تحديد هذه الحدود. فعلى سبيل المثال عند دراسة تغير حجم غاز مع الضغط، بثبوت درجة الحرارة، داخل اناء معدني فأن جدران الاناء هذا تمثل الحدود التي تفصل الغاز ( المنظومة ) عن محيطه وان التغير الحاصل في الحجم يعين بواسطة صفات الغاز فقط دون حجم الاناء الذي يحتويه بأعتبره صلبا غير مرن. بينما اذا كان الاناء مصنوعا من مادة مطاطية فأن حجمه، في هذه الحالة، سوف يتغير مع تغير حجم الغاز، وعليه فأن التغير الحاصل في الحجم هو نتيجة تغير حجم الغاز وحجم الاناء ولذلك يعين بواسطة صفات الغاز وصفات مرونة المادة المطاطية المصنوع منها الاناء. ففي هذه الحالة يطلق على الغاز والاناء بالمنظومة، أي ان الاناء يصبح جزءا من المنظومة.

قد تكون المنظومة متجانسة ( كالغاز أو السائل أو الصلب او محلول بأحد الاطوار ) او غير متجانسة اي متكونة من اكثر من طور واحد تفصلها حدود سطحية ثابتة ( مثل منظومة من سائل وبخاره ). ومن الامور المهمة في الدينامية الحرارية هو التأثير المتبادل (interaction) بين المنظومة ومحيطها. لذا فأن هناك انواع مختلفة من المنظومات فمنها من تسمح بتبادل كلا من المادة والطاقة مع محيطها

وتعرف عندئذ بالمنظومة المفتوحة (Open System) ومنها من لا تسمح بمثل هذا التبادل ويطلق عليها بالمنظومة المعزولة (Isolated System). في حين ان المنظومة التي تسمح بانتقال الطاقة من وإلى المحيط ولا تسمح بانتقال المادة تعرف بالمنظومة المغلقة (Closed System).

### 3-1 حالة المنظومة ومتغيرات الحالة

#### System state and State Variables

كما ذكرنا سابقا ان اهتمام الدينامية الحرارية ينحصر بالصفات العيانية للمادة، لذا من الممكن وصف حالة المنظومة بصورة تامة بدلالة بعض الكميات العيانية التي تعرف بمتغيرات الحالة (State Variables) أو دوال الحالة (State functions) بسبب ان قيمها تعتمد فقط على ظرف أو حالة المنظومة الدينامية الحرارية. ومتغيرات الحالة هي متغيرات مستقلة (Independent variables) تعبر فقط عن قسم من صفات المنظومة في حالة معينة، وان العلاقة بين المتغيرات المعتمدة احداها على الأخرى (Dependent variables) والمتغيرات المستقلة لنفس الحالة تحدد بواسطة معادلة الحالة (State Equation). فمثلا ان الضغط والحجم ودرجة الحرارة هي من متغيرات حالة وان اى اثنتان منها يمكن ان تعطي وصفا تاما للحالة الدينامية الحرارية لكمية معينة من غاز وذلك باستخدام المعادلة العامة للغازات المثالية ( $Pv = nRT$ ). وتعطي هذه المعادلة العلاقة بين متغيرات الحالة ( $P$  و  $V$  و  $T$ ) ومن هنا عرفت بمعادلة الحالة العامة للغازات المثالية. فلو كان لدينا مولا واحدا من غاز مثالي وحددت قيمة ضغطه ( $P$ ) ودرجة حرارته ( $T$ ) فإن مقدار حجمه ( $V$ ) سيكون ثابتا ويمكن حسابه من المعادلة العامة للغازات المثالية. من هنا نرى ان تحديد قيم كل من عدد المولات ودرجة الحرارة والحجم والضغط قد اسهم في تحديد الحالة الدينامية الحرارية للغاز المثالي وان اى تغير في قيم هذه المتغيرات سيؤدي الى تغير الحالة الدينامية الحرارية له. فالطاقة، مثلا، تمثل دالة حالة ويمكن حساب قيمتها الثابتة من قيمتي الضغط ودرجة الحرارة. اضافة الى الخاصية المذكورة اعلاه لدوال الحالة، فان التغير الذي يطرأ على دالة الحالة نتيجة تغير حالة المنظومة يعتمد فقط على الحالة الابتدائية والحالة النهائية لها وليس على الاسلوب الذي انجز به التغير، وهذه كما مبينه اعلاه تمثل احدى خصائص الدينامية الحرارية.



ان الحالات التي تتعامل معها الدينامية الحرارية هي فقط حالات التوازن (Equilibrium States) التي تكون فيها قيم متغيرات الحالة منتظمة لاتتغير مع الزمان والمكان. وهذا يتطلب ان تكون الصفات الميكانيكية للمنظومة ثابتة ومنتظمة، اي ان جميع القوى العاملة على المنظومة او من خلالها تكون في حالة توازن، وهي تمثل حالة توازن ميكانيكي (Mechanical Equilibrium) للمنظومة. اضافة الى ذلك فإن التركيب الكيميائي (Chemical Composition) للمنظومة اذا كانت مكونة من اكثر من مادة واحدة، يجب ان يكون منتظماً لايتغير مع الزمن، اي ان المنظومة يجب ان تكون في حالة توازن كيميائي (Chemical Equilibrium). واخيراً يجب ان تكون المنظومة في حالة توازن حراري (Thermal Equilibrium)، اي يجب ان تكون درجة الحرارة منتظمة خلالها ككل ومساوية الى درجة حرارة المحيط هذا لأن اي اختلاف في درجتي حرارة المنظومة والمحيط سيؤدي الى انتقال في الطاقة الحرارية التي هي احدى متغيرات الحالة وان قيمتها ستصبح غير ثابتة مع الزمن وهذا مايجعل المنظومة في حالة عدم التوازن.

#### 4-1 انواع الخواص الفيزيائية للمنظومة

##### Types of physical properties of the System

هناك نوعان رئيسان من الخواص الفيزيائية للمنظومة وهما خواص الشدة (Intensive properties) وخواص الاتساع (Extensive properties)، وكلاهما من المتغيرات التي تتردد في الدينامية الحرارية. فخواص الشدة لاتعتمد على مقدار المادة، أو المواد، الموجودة في المنظومة، التي هي تحت الدراسة، كدرجة الحرارة والتركيز والضغط واللزوجة والكثافة ومعامل الانكسار والسعة الحرارية المولارية (Molar heat capacity). بينما تعتمد قيم خواص الاتساع على كمية المادة في المنظومة كالسعة الحرارية والحجم والكتلة. تستخدم عادة درجة الحرارة والضغط كمتغيرات لتشخيص حالة المنظومة وذلك لكونهما من خواص الشدة. من الممكن ان تصبح احدى خواص الاتساع خصيصة شدة. فمثلا الكتلة والحجم اللذان هما من خواص الاتساع فإن حاصل قسمتهما يعطي الكثافة التي هي خصيصة شدة. الذي حدث

هو تحديد وحدة كمية المادة فالكثافة وحدتها الكتلة في وحدة الحجم. في بعض الاحيان يمكن لخصيصة ان تكون لاشدة ولا اتساع، ومثال على ذلك الجذر التربيعي للحجم.

## 5-1 عمليات الدينامية الحرارية المختلفة

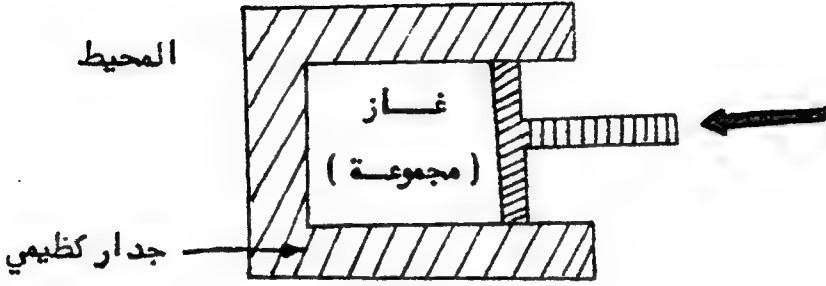
### The Various Thermodynamic Processes

تشمل هذه الفقرة مختلف العمليات التي تطرأ على المنظومة فتسبب تغيراً في حالتها تحت مختلف الظروف. والعمليات بصورة عامة، اما عمليات طبيعية (Natural processes) او غير طبيعية (Unnatural processes). فالعملية التي تحدث بصورة طبيعية من دون اى اجبار لحدوثها تعرف بالعملية الطبيعية، في حين يعرف معكوسها بالعملية غير الطبيعية. اما اذا استخدمت قوى لاجداث عملية غير طبيعية فأنها تصبح في هذه الحالة عملية طبيعية. ومثال لعملية طبيعية هو سقوط مياه الشلالات من اعلى الى اسفل، في حين ان معكوسها، وهو صعود المياه من المنطقة الواطئة الى المنطقة الاعلى، تمثل عملية غير طبيعية. الا انه باستخدام بعض المضخات يصبح من الممكن صعود المياه من المناطق الواطئة الى المناطق الاعلى.

ان العمليات الطبيعية تحدث بصورة تلقائية، لذا تعرف بالعمليات التلقائية (Spontaneous processes) بينما العمليات غير الطبيعية هي عمليات غير تلقائية (Nonspontaneous processes).

### عملية ثابتة درجة الحرارة (Isothermal process)

تطلق على اية عملية تجرى تحت درجة حرارة ثابتة، اى ان درجة حرارة المنظومة لا تتغير خلال التحول. في حين ان العملية التي تجرى من دون اى انبعاث او امتصاص للحرارة، عبر الحدود من المنظومة الى المحيط وبالعكس، تعرف بعملية كظيمة (Adiabatic process). ويطلق على الحدود التي تفصل المنظومة عن المحيط في هذه العملية بالجدار الكظيمي (Adiabatic Wall) كما في الشكل 2-1 الذي يمثل عملية تقلص حجم غاز تحت ظروف كظيمة.



الشكل (2-1)

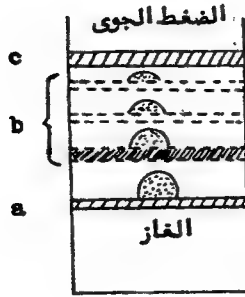
أما العملية التي تحدث ويكون الحجم ثابتا فيطلق عليها عملية ثابتة الحجم (Isochoric process)، بينما التي تجري تحت ضغوط ثابت تعرف بعملية ثابتة الضغط (Isobaric process).

### العملية الدورية (Cyclic process)

تطلق على أية عملية تعانها منظومة تكون فيها الحالة (Cyclic process) يطلق على أية عملية تعانها منظومة تكون فيها الحالة النهائية للمنظومة مماثلة لحالتها الابتدائية، كأن تعانها المنظومة عدة تحولات تعود في النهاية الى حالتها الابتدائية.

أما العملية الرجوعية (Reversible Process) فتوصف بأنها مكونة من عدد لا نهائي من المراحل المتعاقبة والمتناهية الصغر (Infinitesimal) وتكون المنظومة في كل مرحلة من هذه المراحل في حالة توازن. وبما ان العملية المتناهية الصغر تستغرق زمن محدد فإن العملية الرجوعية تحتاج الى زمن لانهاى لاجل اتمامها ويطلق على العملية التي لاتحدث بصورة رجوعية بعملية لارجوعية (Irreversible process). لتوضيح العملية الرجوعية لنأخذ عملية تغير حجم غاز داخل اسطوانة بمكبس عديم الوزن والاحتكاك، ولنفرض انه لدينا كمية معينة من غاز في درجة حرارة معينة وحجم مساو الى حجم الاسطوانة عندما يكون المكبس في الموضع (a) في الشكل (3-1) وضغط مساو الى (س) من الضغوط الجوية. من الطبيعي ان يتطلب هذا وضع مقدار من الاززان، او تسليط قوة بشكل آخر، على مكبس

الاسطوانة بحيث يجعل ضغط الغاز مساو الى ( س ) من الضغوط الجوية تحت نفس الظروف المذكورة اعلاه. وتمثل حالة الغاز هذه الحالة الابتدائية التي يكون فيها الغاز في حالة توازن. لنفرض ان الاوزان الموضوعة على المكبس مقسمة الى وحدات وزنية متناهية الصغر (infinitesimal)، اى الى عدد لانهائي من هذه الوحدات، واننا قد بدأنا برفع هذه الوحدات الوزنية الواحدة بعد الاخرى. فمن البديهي ان رفع أية وحدة وزنية سيؤدي الى تمدد الغاز بسبب ان ضغطه يصبح اكبر من الضغط المسلط عليه بمقدار مكافئ للوزن المرفوع، وفي هذه الحالة يساوى الى مقدار متناهية الصغر. بعد ذلك تصل المنظومة الى حالة التوازن عند تساوي الضغطين، ضغط الغاز والضغط المسلط. من الممكن في هذه الحالة الجديدة للغاز ان ترجع العملية بجعل الغاز يتقاص الى حجمه الاصلي وذلك بأرجاع الوحدة الوزنية، التي رفعت الى المكبس مرة ثانية. لنفرض انه من الممكن الاستمرار بعملية رفع هذه الوحدات الوزنية المتناهية الصغر الواحدة تلو الاخرى، ففي كل مرة يتمدد الغاز بمقدار معين ثم يصل الى حالة التوازن، الى ان ترفع جميعها ويصبح عندئذ ضغط الغاز مساو الى الضغط الجوي ( ١ جو ) وحجم الغاز مساو الى حجم الاسطوانة والمكبس في الموضع (c)، الشكل (3-1). تمثل الحالة الاخيرة هنا الحالة النهائية للغاز التي يكون فيها الغاز في حالة توازن، ايضاً، تحت هذه الظروف. يلاحظ في عملية تمدد الغاز، حركة المكبس من (a) الى (c) في الشكل (3-1)، انه خلال كل مراحل التمدد الممثلة بالمنطقة (b) ان الغاز ( المنظومة ) كان على الدوام في حالة توازن، اي ان الغاز كان في حالة توازن في الحالة الابتدائية، الموضع (a) والمراحل الوسطية لعملية التمدد، المنطقة (b)، والحالة النهائية الموضع (c). تمثل هذه العملية عملية تمدد غاز بصورة رجوعية. والان بفرض رفع كل الاوزان الموضوعة على المكبس دفعة واحدة فالذي يحدث هو ان الغاز سيتمدد بصورة فجائية ويتحرك المكبس من الموضع (a) الى الموضع (c) بمرحلة واحدة. بهذا الاسلوب يكون الغاز في حالة توازن فقط في الحالتين الابتدائية ( الموضع a) والنهائية ( الموضع c) وليس في اية حالة وسطية. ويمثل هذا الاسلوب الذي تمدد به الغاز عملية لارجوعية.



الشكل (3-1)

تتميز العملية الرجوعية بأنها تحتاج الى عدد لانهائي من الخطوات لأجل اتمامها، وهذا يتطلب زمن لانهائي وعليه يمكن القول ان أي تغيير متناهي الصغر في الظروف يمكن ان يرجع العملية في أية لحظة أو موقع، لهذا تعد العملية الرجوعية عملية افتراضية لصعوبة تحقيقها عمليا. بما ان معظم العمليات التي تحدث في الطبيعة تستغرق زمنا معينا لاتمامها، لذا تعتبر جميعها عمليات لارجوعية. ان افضل مثال على عملية يمكن اجرائها مختبرا واعتبارها عملية دينمية حرارية رجوعية هو عمل البطاريات ( الخلايا ) الرجوعية، حيث يمكن ارجاع التفاعلات التي تحدث عند اقطاب الخلية وذلك بتغيير اتجاه القوة الدافعة الكهربائية (emf) مع جهد الخلية.

## 6-1 درجة الحرارة وقانون الصفر للدينامية الحرارية

### (Temperature and the Zero law of Thermodynamics)

من المواضيع الاساسية التي ينبغي تبيانها وتوضيحها قبل الالوج الى المواضيع الاخرى للدينامية الحرارية، هو درجة الحرارة وكيفية تعريفها وقياسها. فوفقا للنظرية الحركية الجزيئية للمادة تعتبر درجة حرارة أية مادة مقياساً للطاقة الحركية لجزيئاتها. لكن كما مر ذكره ان الدينامية الحرارية لاتأخذ بالصفات الجزيئية للمادة، حيث ان تعريف الدينامية الحرارية يعتمد على الملاحظة التجريبية للجسم ككل ويهمل موضوع الطبيعة الجزيئية للمادة. لنفرض ان لدينا جسمين ( س ) و ( ص ) منفصلان ومختلفان في درجة سخونتهما. في الواقع، من الممكن تحديد درجة سخونة

الجسمين ( س ) و ( ص ) وتعيين ايهما الاسخن، أو أيهما الابرء، بواسطة اللمس. الا ان درجة الدقة في هذا المقياس ( حاسة اللمس ) محدودة وتعتمد على عوامل عديدة لاتصلح في القياسات الدقيقة خاصة عندما تكون درجة سخونة الجسمين متقاربة جداً بحيث يصبح من الصعب تحديد ايهما الاسخن. لذلك من الضروري ايجاد تعريف كمي لدرجة الحرارة وايجاد وسيلة اكثر دقة واعتمادا لقياسها.

من الحقائق التجريبية هي انه عند وضع جسمين يختلفان في درجة سخونتهما، كالجسمين ( س ) و ( ص ) على سبيل المثال، في حالة تماس مع بعضهما فالملاحظ، بعد مضي فترة زمنية معينة، ان الجسمين يصلان الى نفس درجة السخونة فيقال حينذاك بأن الجسمين قد وصلا الى حالة توازن حراري. اضافة الى ذلك فإن الجسم الذي كان الاسخن قبل الوصول الى حالة التوازن يبدو وكأنه قد برد بعد الوصول الى حالة التوازن، بينما الجسم الذي كان الابرء يبدو وكأنه قد سخن. في الواقع ان ماحدث، لهذين الجسمين عند التماس هو انتقال الحرارة ( التي هي احدى اشكال الطاقة ) من الجسم الساخن الى الجسم الابرء الى ان وصل الجسمان الى حالة التوازن الحراري، وهذا يعني ان الحرارة تنتقل من الجسم الساخن ( الاعلى درجة حرارة ) الى الجسم البارد ( الاوطأ درجة حرارة ) الى ان تنشأ حالة توازن حراري بينهما. من الحقائق التجريبية الملاحظة ايضاً هي انه اذا كان الجسم ( س ) في حالة توازن حراري مع الجسم ( ص ) وكان الجسم ( س ) كذلك في حالة توازن حراري مع جسم ثالث ( ع ). فإن الجسمين ( ص ) و ( ع ) يكونان في حالة توازن حراري مع بعضهما. تعرف هذه الحقيقة التجريبية بقانون الصفر للدينامية الحرارية. لقد مكنت هذه الملاحظة من وضع مقاييس ( كالمحرار الزئبقي والمحرار الغازي .. الخ ). لقياس درجة الحرارة لاي جسم. وعليه فوفقاً لقانون الدينامية الحرارية الصفر، ان اي جسمين في حالة توازن حراري مع بعضهما يكونا في درجة حرارة واحدة، وان اي جسمين ليسا في حالة توازن حراري لا يكونا في درجة حرارة متماثلة، اي يكونا في درجتى حرارة مختلفين. وعليه فإن تعيين درجة حرارة جسم معين يتطلب تحقق التوازن الحراري بين ذلك الجسم والمقياس المستخدم لقياس درجة حرارته، وعادة يكون المقياس معير ومدرج مسبقاً مع جسم آخر قياس وتحت ظروف معينة.

لنفرض ان الجسم ( س ) يمثل محراراً في حالة توازن حراري مع الجسم ( ص ) ، الذي يمثل جسم قياس لتعبير وتدرج المحرار ، وان درجة الحرارة تساوي الى ( ن ) درجة . فاذا نشأ توازن حراري بين المحرار وجسم ثالث يراد تعيين درجة حرارته ، كالجسم ( ع ) ، وفي نفس درجة الحرارة ( ن ) فإنه يمكن اعتبار ( ص ) و ( ع ) في حالة توازن حراري وان درجة حرارة الجسم ( ع ) هي ( ن ) ايضاً .

من المقاييس الحرارية المستخدمة هو المقياس المئوي ( مقياس سلسيوس Celsius scale ) ومقياس درجة الحرارة المطلقة ( Absolute Temperature scale ) فالمقياس المئوي ، على سبيل المثال ، مبني على اساس اعطاء القيمة صفر لقراءة المحرار ، عند ملئه بالزئبق ، عندما يكون ومحتوياته في حالة توازن حراري مع خليط متوازن حرارياً من الماء السائل والصلب وفي تماس مع الهواء وتحت ضغط جوي واحد ، أي لدرجة انجماد الماء وانصهار الجليد . ثم اعطاء القيمة مئة لقراءة المحرار عندما يكون ومحتوياته في حالة توازن حراري مع بخار الماء المتوازن حرارياً مع الماء السائل تحت ضغط جوي واحد ، اي لدرجة غليان الماء . بعد ذلك تقسم المسافة الفاصلة بين هاتين النقطتين المعيّنتين الى مئة جزء واعتباراً ان كل جزء يمثل درجة حرارة مئوية واحدة . وعليه فإن ارتفاع عمود الزئبق في أية درجة حرارة اخرى يساوي الى درجة الحرارة بالمقياس المئوي . يبدو من ذلك ان درجة الحرارة تعتمد خطياً على حجم عمود الزئبق في المحرار . ومجمل القول ان انشاء مقياس لدرجة الحرارة وتعريف قراءة الصفر والمئة وتعريف مقدار درجة الحرارة الواحدة كان يعتمد على القانون الصفر للدينامية الحرارية .

في الواقع ان هناك انواع اخرى من مقاييس درجه الحرارة مثل محرار الهيدروجين المبني على اعتماد درجة الحرارة على الضغط تحت حجم ثابت والمحرار البلاتيني الذي انشأ على اساس علاقة درجة الحرارة بالمقاومة ، والمزدوج الحراري ( Thermocouple ) المبني على العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية ( emf ) ودرجة الحرارة ، اضافة الى محارير عديدة اخرى . ان تقييس ( معايرة ) هذه المحارير يتم على اساس ان جميعها تعطي القراءة صفر لدرجة انصهار الجليد والقراءة مئة لدرجة غليان الماء تحت الظروف المذكورة اعلاه . لكن الملاحظ هو ان قراءات هذه المحارير تكون متباينة بعض الشيء في درجات الحرارة الواقعة بين القراءتين صفر ومئة اعتماداً على

طبيعة المواد التي تتكون منها المحارير كما هو مبين في الجدول (1-1). وبسبب هذا الاختلاف في قراءات المحارير المختلفة، ولأجل إيجاد مقياس درجة حرارة قياس ومعتمد فقد اتفق على اختيار احدى صفات الغاز المثالي كمقياس لدرجة الحرارة وذلك لأن جميع الغازات في الكثافات الواطئة وتحت حجم ثابت تظهر نفس العلاقة الخطية للضغط مع درجة الحرارة. لذلك من الحكمة بمكان تعريف درجة الحرارة بدلالة صفات الغازات المثالية، أي تعريف درجة الحرارة كما قيست على مقياس الغاز المثالي. فلكمية معينة من غاز مثالي تحت حجم ثابت، تتناسب درجة الحرارة طردياً مع الضغط، أي أن.

$$P \propto t$$

الجدول (1-1)\*

المزدوج الحراري °م	الحرار الزئبقي °م	الحرار البلايني °م	الحرار الهيدروجيني °م
0	0	0	0
40.297	40.111	40.360	40
80.147	80.041	80.240	80
100.000	100.000	100.000	100

\* M.W. Zemansky, «Heat and Thermodynamics» McGraw-Hill, New York 1951.

ويمكن كتابة هذه العلاقة على هيئة معادلة خطية كما يلي:

$$P = P_0 + \alpha P_0 t$$



ومنها يحصل على

$$P = \alpha P_0 \left( \frac{1}{\alpha} + t \right) = \alpha P_0 T$$

حيث  $T = (1/\alpha) + t$  وتعرف بدرجة الحرارة المطلقة، و  $273.15 = (1/\alpha)$  على اعتبار ان درجة انصهار الجليد هي صفر مئوي [ أو  $273.16 = (1/\alpha)$  اذا اخذت النقطة الثلاثية (triple point) للماء ] ودرجة غليان الماء مئة مئوي وكليهما تحت ضغط جوي واحد وفي تماس مع الهواء. تعطي المعادلة الاخيرة التناسب الطردي بين درجة الحرارة المطلقة والضغط لكمية معينة من غاز مثالي تحت حجم ثابت. اذا كان ضغط الغاز في درجة حرارة  $T_1$  هو  $P_1$  وفي درجة حرارة  $T_2$  هو  $P_2$  فإن

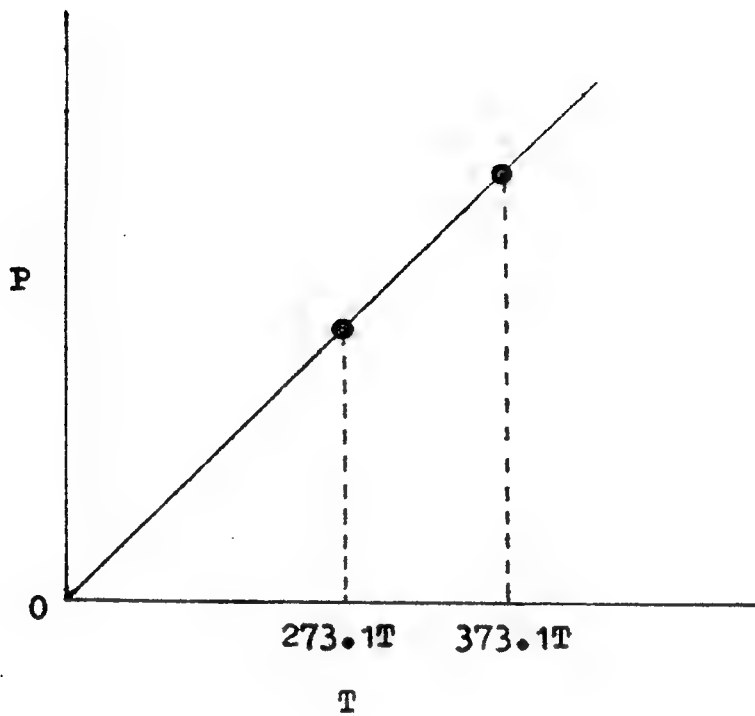
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

وباستخدام هذه المعادلة يصبح من الممكن إيجاد درجة الحرارة. فمن تعيين ضغط كمية معينة من غاز مثالي، تحت حجم ثابت، في درجتى انصهار الجليد ( $273.15$  درجة مطلقة) وغليان الماء ( $273.15$  درجة مطلقة) وكليهما تحت ضغط جوي واحد، ورسم النتائج كما في الشكل (4-1) واعتبار المسافة الفاصلة بين النقطتين مساوية الى مئة درجة مئوية يصبح من الممكن تعيين درجة حرارة أي جسم عند قياس ضغط الغاز المثالي، الذي في حالة توازن حراري مع ذلك الجسم، واستخراج درجة الحرارة من الشكل (4-1).

يمكن كذلك استخدام العلاقة الطردية بين درجة حرارة كمية معينة من غاز مثالي تحت ضغط ثابت وبين حجم الغاز. ومنها نحصل على العلاقة:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

وهي الاخرى يمكن استخدامها لقياس درجة الحرارة.



الشكل (4-1)

## الفصل الثاني

### القانون الاول للدينامية الحرارية

ان مسألة الحصول على أقصى شغل مفيد من كمية معينة من الحرارة كانت احدى اهم المسائل التي تركزت حولها الدراسات والتجارب التي اظهرت صعوبة تحويل الحرارة كلياً الى شغل وامكانية العكس ( اي امكانية تحويل الشغل بصورة كمية الى حرارة )

ان اكتشاف الحرارة كشكل من اشكال الطاقة اضافة الى اكتشافات ودراسات ادت جميعها الى ما يعرف بقانون حفظ الطاقة الذي ينص على ان الطاقة لايمكن ان تفنى او تستحدث لكن يمكن تحويلها من شكل الى اخر ، اي انه عند اختفاء كمية معينة من طاقة يجب ان تظهر كمية مكافئة من نوع اخر من الطاقة . لتوضيح ذلك لناخذ جسماً كتلته (m) موضوع على مسافة (l) من سطح الأرض . بحكم موقع هذا الجسم فإن طاقته الكامنة تكون (mg l) ، حيث (g) التعجيل الأرضي ، وهي تمثل طاقته الكلية بسبب كون الطاقة الحركية للجسم تساوي صفر عندما يكون الجسم في حالة سكون ، اي ان سرعته تساوي صفر . اما اذا كان نفس الجسم في حالة سقوط بصورة شاقولية على سطح الأرض وبسرعة (v) وعلى بعد (l) من سطح الأرض فإن طاقته الكلية (E) تساوي ، في هذه الحالة ، مجموع طاقته الكامنة (mgl) وطاقته  $(\frac{1}{2} mv^2)$  كما معطاة في المعادلة الآتية :

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2} mv^2 + mg \quad \dots(2-1)$$

فكلما اقترب الجسم الساقط من سطح الأرض تقلص المسافة الفاصلة بينهما وتنخفض طاقته الكامنة . ولكي تبقى الطاقة الكلية (E) ثابتة يجب ان تزداد طاقته الحركية . وعند ارتطام الجسم بسطح الأرض ، حيث (l) تساوي صفر ، تتحول

كل طاقته الكامنة الى طاقة حركية كي تبقى الطاقة الكلية للجسم ثابتة . يتبين من هذا المثال ، كيف ان الطاقة في منظومة يمكن ان تتحول من شكل الى اخر كي تبقى طاقتها الكلية ثابتة .

في الواقع ان حفظ الطاقة يشمل ، اضافة الى باقي اشكال الطاقة ، كلا من الحرارة والشغل اللذان يعتبران شكلان من اشكال الطاقة يمكن انتقالهما من منظومة الى اخرى . ويعرف قانون حفظ الطاقة بالقانون الاول للدينامية الحرارية نظراً لشموليته .

## 1-2 الشغل work

يعرف الشغل (w) ، وفقاً للدينامية الحرارية ، بأنه انتقال طاقة من منظومة الى اخرى . فالشغل (w) الميكانيكي يعرف بأنه القوة (F) مضروبة بالمسافة (l) التي تؤثر خلالها القوة ، اي ان :

$$W = \int_{l_1}^{l_2} F X (dl) \quad \dots(2-2)$$

وعندما تكون القوة ثابتة فيمكن وضعها خارج تكامل المعادلة (2-2) التي تعطي بعد تكاملها المعادلة الآتية :

$$W = F (l_2 - l_1) = F X l \quad (2-3)$$

اما الشغل اللازم لرفع جسم كتلته (m) مسافة (l) عن سطح الارض فيساوي الى :

$$W = mg l \quad \dots(2-4)$$

ان المقدار (mg) في المعادلة (2-4) يساوي الى القوة المؤثرة .

## مثال (1-2)

احسب الشغل المنجز عند رفع جسم كتلته (75) كغم بصورة عمودية مسافة (10) امتار عن سطح الأرض .

الحل :

لحساب الشغل المنجز نستخدم المعادلة (2-3) ، وبالتعويض عن كل حد في المعادلة ، اخذين بنظر الاعتبار ضرورة استخدام الوحدات المناسبة لكل حد ، نحصل على :

$$W = m \times g = 75 \times 9.8 \text{ م ثا}^{-2} \times 10 = 7350 \text{ كغم م ثا}^{-2}$$

يمكن التعبير عن وحدات الشغل بوحدات النيوتن بالمتر على اعتبار ان النيوتن يساوي ( كغم م ثا<sup>-2</sup> ) ، وعليه يكون الشغل المنجز مساوياً الى :

$$W = 7350 \text{ نيوتن متر}$$

وبما ان النيوتن متر يساوي جول ، لذا يكون مقدار الشغل المنجز بوحدات الجول .

$$W = 7350 \text{ جول}$$

ولكن الجول وحده من وحدات الطاقة ، لذا تكون للشغل نفس وحدات الطاقة . هناك نوع اخر من الشغل وهو الشغل الناجم عن تغير في الحجم الذي يصاحب بعض العمليات . ويلاحظ مثل هذا الشغل في الكثير من التفاعلات الكيميائية ، حيث يحدث تغير في الحجم ، كتمدد الغازات . ويمكن توضيح هذا النوع من الشغل كما يلي :

$$\text{القوة} \\ \hline \text{المساحة} = \text{بما ان الضغط}$$

ان القوة = الضغط  $\times$  المساحة  
ومن تعريف الشغل :

$$\text{الشغل} = \text{القوة} \times \text{المسافة}$$

فاننا نحصل على :

$$\text{الشغل} = \text{الضغط} \times \text{المساحة} \times \text{المسافة}$$

وبما ان :

$$\text{المساحة} \times \text{المسافة} = \text{الحجم}$$

لذا فإن

$$\text{الشغل} = \text{الضغط} \times \text{الحجم}$$

وهذا النوع من الشغل يطلق عليه احياناً بشغل ( ضغط حجم )

قبل الاستمرار في شرح حسابات الشغل من الضروري ان نذكر ما متفق عليه دولياً بصدد اشارة الشغل، فالشغل نتيجة تفاعل المنظومة مع المحيط يكون منه عين، الشغل الذي تنجزه المنظومة على المحيط والشغل الذي ينجزه المحيط على المنظومة. والمتفق عليه حديثاً ان يكون الشغل موجباً اذا كان الشغل منجز من قبل المحيط على المنظومة ويكون سالباً اذا قامت المنظومة بالشغل. اذ ان الشغل الذي ينجز على المنظومة يؤدي الى حصولها على طاقة، في حين انها تفقد اذا قامت بشغل. ان هذا الاتفاق حول اشارة الشغل هو في الواقع عكس ما كان عليه سابقاً كما يلاحظ ذلك في كتب الكيمياء القديمة.

## 2-2 الشغل نتيجة تغير الحجم

يعرف الضغط (P) لغاز بأنه القوة (F) على وحدة المساحة (A). اي

$$P = \frac{F}{A}$$

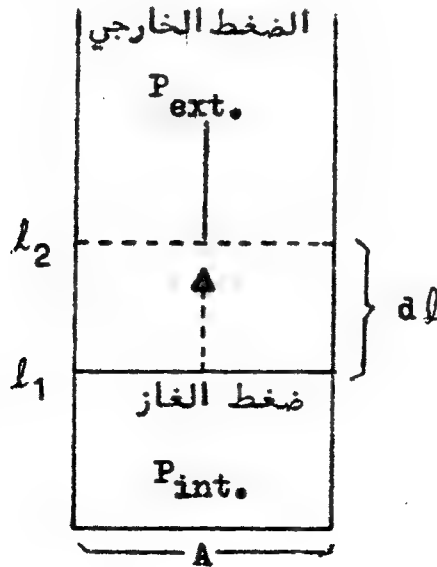
او

$$F = P \times A \quad \dots (2-4)$$

فاذا عوضنا عن القوة (F) في المعادلة (2-2) بما يساويها من المعادلة (2-4) ينتج

$$W = \int_{l_1}^{l_2} P \times A \times dl \quad \dots (2-5)$$

لنتصور انه لدينا اسطوانة مساحة مقطعها (A) تحتوي على غاز (المنظومة) وبمكبس عديم الوزن والاحتكاك، كما في الشكل (1-2). لنفرض ان ضغط الغاز داخل الاسطوانة هو ( $P_{int.}$ ) والضغط المسلط على المكبس؛ (الضغط



الشكل (1-2): تمدد غاز في اسطوانة.

الخارجي) هو ( $P_{ext.}$ ). فاذا كان الضغط الداخلي للغاز اكبر من الضغط المسلط فأن الغاز يتمدد ويستمر بالتمدد الى ان يتساوى الضغطان. لنفرض انه نتيجة اختلاف الضغطين وتمدد الغاز ضد الضغط الخارجي قد تحرك المكبس مسافة  $dl$ ، كما في الشكل (1-2). فالشغل المنجز من قبل الغاز نتيجة تمدده ضد الضغط الخارجي المسلط يساوي الى:

$$W = \int_{l_1}^{l_2} - P_{ext.} A dl \quad \dots(2-6)$$

لقد وضعت الاشارة السالبة للدلالة على ان المنظومة (الغاز في هذه الحالة) هي التي انجزت الشغل على المحيط، وان  $l_1$ ،  $l_2$  يمثلان موقعي المكبس قبل وبعد التمدد على التوالي. ان التغير في الحجم ( $dV$ ) نتيجة تمدد الغاز يساوي الى

(Axdl) وبالتعويض عن ذلك في المعادلة (2-6)، وجعل حدى التكامل  $v_1$  و  $v_2$  بدلاً من  $I_1$  و  $I_2$  على التوالي نحصل على:

$$W = - \int_{v_1}^{v_2} P_{\text{ext.}} dv \quad \dots\dots(2-7)$$

اما في حالة تقلص الغاز، حيث ينجز الشغل من قبل المحيط على المنظومة فيعطى بالمعادلة التالية:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} P_{\text{ext.}} dv \quad \dots(2-8)$$

يلاحظ في المعادلة (2-7) وكذلك المعادلة (2-8) ان الضغط ليس بضغط الغاز داخل المنظومة نفسها، بل هو الضغط المسلط على المكبس الذي يتمدد او يتقلص مقابلة الغاز. بما ان الضغط ليس دالة للحجم، وعليه فأن التكامل في المعادلة (2-7) لا يمكن حله مالم يبين الاسلوب الذي اتبع في التحول من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية للمنظومة. يستنتج من ذلك ان مقدار الشغل المنجز (W) يعتمد على الاسلوب الذي انجز به التغير في حالة المنظومة، كما سيلاحظ ذلك عند مقارنة مقادير الشغل المنجز باختلاف طرق الانجاز. لذا فالشغل ليس دالة دينمية حرارية للمنظومة، بل انه يمثل الطريقة التي يمكن لطاقة المنظومة ان تتغير. لذلك سيكتب الشغل (W) بدلاً من dW لان dW هو تفاضل غير مضبوط (inexact differential)، والسبب في ذلك يرجع الى ان:

$$dw = \int P dv$$

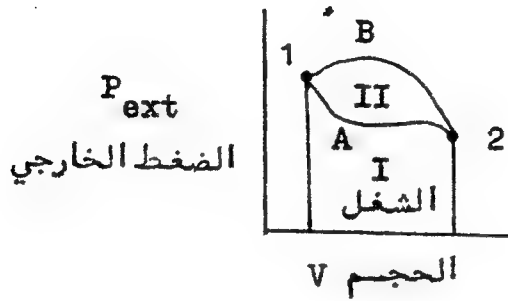
وان (PdV) هو تفاضل غير مضبوط لأن (P)، عموماً، هو دالة لمتغيرين درجة الحرارة (T) والحجم (V). لذا فأن تكامل PdV يكون عديم المعنى مالم تعين علاقة دالية بين (T) و (V)، وتحت هذه الظروف يمكن للمعادلة غير المضبوطة ان تحل بالتكامل، كذلك يلاحظ من المعادلة (2-8)، اضافة الى ماتقدم ان ( $P_{\text{ext.}}$ ) هو دوماً موجب، وعليه تكامل المعادلة سيكون موجباً او سالباً اعتماداً على قيمتي الحجم



النهائي ( $V_2$ ) والحجم الابتدائي ( $V_1$ ).

يهمل عادة الشغل المنجز في حالة تمدد المواد الصلبة والسائلة لصغره وذلك بسبب ضالة التغير في الحجم الحاصل ويأخذ الشغل المنجز في حالة تمدد الغازات بنظر الاعتبار فقط .

كما بينا ان حساب الشغل المنجز في عملية تمدد او تقلص غاز يتطلب معرفة الضغط الخارجي المسلط على المنظومة ولا حاجة الى حالة التوازن مع الضغط الخارجي . فاذا كان ممكناً في عملية معرفة الضغط الخارجي في كل مرحلة من مراحل التمدد او التقلص لتغير محدود في الحجم فإنه يصبح من الممكن ، في هذه الحالة ، رسم العملية بيانياً بين الضغط الخارجي ( $P_{ext}$ ) والحجم ( $V$ ) ، ويعرف مثل هذا الرسم بمخطط الدليل (indicator diagram) كما في الشكل (2-2) . يبين الشكل (2-2) عمليتي تمدد غاز من حج ابتدائي ( $V_1$ ) الى حجم نهائي ( $V_2$ ) وبالمسارين (A) و (B) ويمثل المنحني الناتج من الرسم الاسلوب الذي انجز به التمدد والمساحة الواقعة تحت كل منحني تساوي الشغل الناتج من تلك العملية . فالمساحة المثلثة بالمنطقة (I) تساوي للشغل المنجز وفق المسار (A) والشغل الناتج وفق المسار (B) يساوي الى المساحة الكلية الواقعة تحت المنحني والتي تساوي مجموع مساحتي المنطقتين (I) و (II) في الشكل (2-2) . وهذا دليل ساطع على ان الشغل (W) لايمثل دالة حالة لاعتماد مقداره على الاسلوب الذي انجز به .



الشكل (2-2)

## 3-2 حسابات الشغل المنجز تحت ظروف مختلفة

### 1 — الشغل المنجز تحت حجم ثابت :

عند بقاء الحجم ثابتاً فإن المقدار (dv) يساوي صفراً، وعليه فإن الشغل المنجز وفق المعادلة (7-2) يساوي صفراً كذلك ( اي  $W = \text{صفر}$  ) .

### 2 — الشغل المنجز ضد ضغط مقداره صفر :

يعرف تمدد غاز مقابل ضغط مقداره صفر بالتمدد الحر (Free Expansion) كما هو الحال لتمدد غاز في اناء مربوط باخر مفرغ من الهواء يفصلهما صنوبر كما في الشكل (3-2) . فإذا فتح الصنوبر بين الانائين فسيتمدد الغاز ويملاً الاناء الذي كان مفرغاً من الهواء . يلاحظ في هذه الحالة ان تمدد الغاز كان ضد ضغط خارجي مساو الى صفر (  $P_{\text{exp}} = \text{صفر}$  ) وعليه ووفقاً للمعادلة (7-2) فإن .  
 $W = \text{صفر}$



الشكل ( 3-2 ) : التمدد الحر لغاز .

اي ان الغاز لم ينجز اي شغل نتيجة تمدده . يبين هذا المثال كيف ان الضغط الخارجي هو الذي يدخل في حساب الشغل المنجز نتيجة تغير حجم غاز .

## 4-2 الشغل المنجز ضد ضغط ثابت ( عملية ثابتة الضغط ) Isobaric Process

في حالة تمدد غاز ضد ضغط ثابت فإنه يصبح من الممكن اخراج المقدار  $(P_{ext.})$  خارج تكامل المعادلة (7-2) لتصبح :

$$W = - P_{ext.} \int_{V_1}^{V_2} dV \quad \dots(2-9)$$

وتكون نتيجة تكامل المعادلة (9-2) مايلي :

$$W = - P_{ext.} (V_2 - V_1) = - P_{ext.} \Delta V \quad \dots(2-10)$$

حيث  $(\Delta V)$  يمثل التغير في حجم الغاز . ويرافق عملية تغير حجم الغاز من  $V_1$  الى  $V_2$  تحت ضغط ثابت وفق معادلة الحالة العامة للغازات المثالية تغير درجة حرارة الغاز من  $T_1$  الى  $T_2$  ، ( حيث  $T_1$  درجة الحرارة المطلقة للغاز في  $V_1$  و  $T_2$  درجة الحرارة المطلقة للغاز في  $V_2$  ) . لذا فإن :

$$P(V_2 - V_1) = P \Delta V = nR (T_2 - T_1) = nR \Delta T$$

وعليه يصبح الشغل المنجز من المعادلة (10-2) كما يلي :

$$W = - nR (T_2 - T_1) = - nR \Delta T \quad \dots(2-11)$$

مثال (2)

يغلي مقدار من سائل داخل اسطوانة تحتوي على مكبس متحرك ، حيث يشغل بخاره حجماً مقداره  $(V)$  لتر . احسب مقدار الشغل الذي يساويه البخار اذا تمدد حجمه ضد الضغط الجوي بمقدار  $(5)$  لتر .

الحل

لحساب الشغل المنجز نتيجة تمدد الغاز نستخدم المعادلة (7-2)

$$W = - P_{\text{ext.}} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{\text{ext.}}(V_2 - V_1)$$

فما ان  $P_{\text{ext.}} = 1$  جو و  $V = V_1$  لتر و  $V_2 = (5 + V)$  لتر فبالتعويض في المعادلة اعلاه يكون الشغل كما يلي :

$$W = -1 \times [(5 + V) - V] = -5 \text{ لتر جو}$$

تعني الاشارة السالبة التي تسبق مقدار الشغل المنجز ان المنظومة هي التي قامت بالشغل على المحيط .

والان لتحويل وحدات الشغل من ( لتر جو ) الى الجول نستخدم معامل التحويل التالي لنسبة قيمتي (R) بوحدة الجول الى وحدة اللتر — جو : —

$$101.3902 = \frac{8.314}{0.082}$$

اي ان

$$1 \text{ لتر جو} = 101.3902 \text{ جول}$$

وعليه نحصل على مقدار الشغل المنجز بوحدات الجول كما يلي :

$$506.9512 = 101.3902 \times 5 \text{ جول}$$

وعليه فأن الشغل المنجز = - (506.9512) جول .

اي اننا اذا اردنا تحويل مقدار الشغل من لتر جو الى جول نضرب مقدار الشغل بالمقدار (101.3902) واذا كان المراد العكس نقسم الشغل على المعامل .

مثال (3)

احسب الشغل المنجز في عملية تجمد ثلاثة مولات من الماء في درجة الصفر المئوي وتحت ضغط جوي واحد . علماً ان الحجم المولاري للماء السائل . 0.018 لتر والحجم المولاري للجليد 0.0196 لتر .

## الحل

من المعلوم ان الماء السائل يتمدد عندما يتجمد، اي ان الحجم النهائي  $V_2 < V_1$  الحجم الابتدائي  $V_1$ ، وعليه فأن المنظومة تقوم بالشغل. بما ان عملية الانجماد حصلت ضد الضغط الجوي، لذا يمكن اعتبار الضغط المسلط ( $P_{ext.}$ ) يساوي مقدار ثابت ( وهو 1 جو ) خلال عملية الانجماد.

وعليه فباستخدام المعادلة التالية ( المعادلة 7-2 ) ( بعد تكاملها ) :

$$W = - P_{ext.} (V_2 - V_1)$$

يمكن حساب الشغل المنجز. في هذه الحالة يمكن حساب ( $V_1$ ) من الحجم المولاري للماء السائل، حيث ان حجم المول الواحد من السائل = 0.018 لتر.  
حجم المول الواحد من الماء السائل = 0.018 لتر

فيكون حجم ثلاثة مولات من الماء السائل  $(V_1) = 3 \times 0.018 = 0.054$  لتر.

وحيث ان الحجم المولاري للجليد يساوي 0.0196 لتر، فعليه يكون :

$$(V_2) \text{ حجم ثلاثة مولات من الماء المتجمد } = 3 \times 0.0196 =$$

$$= 0.0588 \text{ لتر}$$

وعليه فان الشغل المنجز ( $W$ ) نتيجة تجمد ثلاثة مولات من الماء يساوي :

$$W = (1-) \times (0.045 - 0.0588) = - (0.0048) \text{ لتر جول}$$

$$= - (0.4866) \text{ جول}$$

## 5-2 الشغل المنجز في عملية تمدد او تقلص غاز مقابل ضغط متغير

اذا كان كل من الحجم ( $V$ ) والضغط ( $P$ ) متغيرين ففي هذه الحالة يجب

معرفة احد المتغيرين بدلالة الثاني كأن يكون كما يلي :

$$P = \frac{a}{V} = P_{ext.}$$

حيث  $a$  مقدار ثابت. لحساب الشغل المنجز من تمدد الغاز نعوض عن

$P_{ext.}$  في المعادلة (7-2) بالمقدار  $(a/V)$  واخراج المقدار الثابت ( $a$ ) خارج التكامل

فنحصل على :

$$W = -a \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = -a \ln \frac{V_2}{V_1} = a \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \dots (2-12)$$

يمثل الشغل (W) في المعادلة (2-12) الشغل المنجز من قبل المنظومة على المحيط وهي عملية تتمدد أي أن  $V_1 < V_2$ . أما في حالة التقلص فيتم بقيام المحيط بالشغل على المنظومة ويكون بعكس الإشارة، كما بينا ذلك.

## 6-2 الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة (Work done in a reversible isothermal expansion)

لقد تطرقنا في الفصل الأول إلى العملية الرجوعية وبيننا أنها تطلق على أية عملية تجري بحيث تكون القوة الدافعة في أية مرحلة من مراحل التغير تزيد بمقدار متناهي الصغر على القوة المضادة والتي يمكن إرجاعها ( العملية ) وذلك بزيادة القوة المضادة بمقدار متناهي الصغر أيضاً، كذلك، أن من خصائص العملية الرجوعية أن الضغط الداخلي يكون على الدوام مساوياً إلى الضغط الخارجي المسلط، وأن العملية الرجوعية تحتاج إلى زمن ما لانهاية لأجل إتمامها لذلك تعتبر جميع العمليات الطبيعية عمليات لا رجوعية. مع كل ذلك فإن لموضوع الرجوعية أهمية كبيرة من الناحيتين النظرية والعملية.

لنفرض لدينا غاز مثالي داخل أسطوانة. كما في الشكل (2-1)، وسمح للغاز بالتمدد ضد ضغط خارجي ( $P_{ext.}$ ) نتيجة لتغير ضئيل في حجمه ( $dV$ ). كما نعلم فإن الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز يعطى بالمعادلة (2-7). والآن لنفرض أن الضغط الخارجي المسلط ( $P_{ext.}$ ) يساوي صفراً، ففي هذه الحالة فإن الشغل المنجز يساوي صفراً أيضاً. كما في المعادلة التالية:

$$W = -P_{ext.}(V_2 - V_1) = -0(V_2 - V_1) = \text{صفر}$$

وإذا زيد الضغط الخارجي المسلط ( $P_{ext.}$ ) من قيمته المساوية صفراً بمقدار معين فإن الشغل المنجز سيزداد كذلك ويصبح أكبر من الصفر. ويستمر مقدار الشغل المنجز في عملية تمدد الغاز باستمرار زيادة الضغط الخارجي المسلط إلى أن يصبح الضغط.

الخارجي المسلط مساوياً الى ضغط الغاز نفسه ( $P_{gas}$ )، عند هذه المرحلة لا يحدث اي تغير في الحجم بسبب تساوي الضغطان، لكن بعد هذه المرحلة اذا تابعنا في زيادة الضغط الخارجي المسلط بحيث اصبح اكبر من ضغط الغاز ( اي  $P_{gas} < P_{ext.}$  ) داخل الاسطوانة فان العملية تصبح عملية تقلص في حجم الغاز .

بما ان الضغط الخارجي المسلط ( $P_{ext.}$ ) في العملية الرجوعية اكبر بمقدار متناهي الصغر من ضغط الغاز ( $P_{gas}$ )، لذا فإن الشغل المنجز في عملية تمدد الغاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة يصبح اقصى شغل ( $W_{max.}$ ) يمكن ان تقوم به المنظومة. اي ان اقصى شغل (Maximum work) يمكن الحصول عليه من منظومة هو عندما يكون التغير الذي تعانيه المنظومة تغيراً رجوعياً بسبب ان التمدد يتم مقابل اقصى ضغط ممكن والذي هو في حالة العملية الرجوعية، اي في حالة توازن مع القوة الدافعة. لذا فتحت الظروف الرجوعية يكون من الممكن استبدال الضغط الخارجي ( $P_{ext.}$ ) بضغط الغاز نفسه ( $P_{gas}$ )، وتصبح المعادلة (7-2) كما يلي :

$$W_{max} = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} dV = - \int_{V_1}^{V_2} P_{gas} dV \quad \dots(2-12)$$

حيث  $W_{max}$  يمثل الشغل المنجز في عملية تمدد الغاز بصورة رجوعية ثابتة درجة الحرارة وهو اقصى شغل يمكن الحصول عليه. فاذا افترضنا ان الغاز يسلك سلوكاً مثالياً فإنه، وبلاستعانة بمعادلة الحالة العامة للغازات المثالية، يكون من الممكن التعبير عن ضغط الغاز بدلالة حجمه وذلك لتبسيط تكامل المعادلة (12-27)، اي ان :

$$P_{gas} = \frac{nRT}{V} \quad \dots(2-13)$$

وبالتعويض عن  $P_{gas}$  في المعادلة (12-2) بما يساويها في المعادلة (13-2) نحصل على :

$$W_{max} = - \int_{V_1}^{V_2} nRT \frac{dV}{V} \quad \dots(2-14)$$

ولكون ان عملية التمدد تتم في درجة حرارة ثابتة ، اي ان (T) تصبح في هذه الحالة ثابتة ، حيث يمكن اخراجها مع الثابتين الاخرين خارج التكامل ، نحصل على :

$$W_{\max} = - nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \quad \dots(2-15)$$

اصبح من الممكن الان اجراء تكامل المعادلة (2-15) بعد ان اصبحت تحتوي على متغير واحد ( الحجم ) ، والنتيجة هي :

$$W_{\max} = - nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = - 2.303 nRT \log \frac{V_2}{V_1} \quad \dots(2-16)$$

وبواسطتها يمكن حساب الشغل المنجز من قبل غاز في عملية رجوعيه ثابتة درجة الحرارة .

#### مثال (4)

احسب الشغل المنجز نتيجة تمدد مول واحد من غاز مثالي بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة في درجة حرارة 27 مئوية ومن حجم (10) لتر الى حجم (100) لتر .

#### الحل

بما ان العملية رجوعية فأن الشغل المنجز يمثل اقصى شغل يمكن الحصول عليه . ولكون العملية ثابتة درجة الحرارة ايضاً فأن الشغل المنجز يمكن حسابه باستخدام المعادلة (2-16) . في هذه المعادلة تمثل n عدد مولات الغاز، T درجة الحرارة المطلقة،  $V_1$  الحجم الابتدائي للغاز و  $V_2$  الحجم النهائي . في الواقع ان وحدات الشغل المنجز تحدها وحدات R المستخدمة في الحسابات . فعندما  $R = 0.082$  لتر جو مول<sup>-1</sup> (درجة مطلقة)<sup>-1</sup> فأن الشغل المنجز يساوي :

$$W_{\max} = - 2.303 (1 \text{ mole})(0.082 \text{ l. atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(300^\circ\text{K}) \log \frac{100}{10}$$

$$= - 56.65 \text{ l. atm ( لتر جو )}$$



وعندما  $R = 1.987$  سرعة مول<sup>-1</sup> ( درجة مطلقة )<sup>1</sup> فإن الشغل يساوي :

$$W_{\max} = -2.303 (1 \text{ mol}) (1.987 \text{ Cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) (300^\circ \text{K}) \log \frac{100}{10}$$

$$= -1372.82 \text{ Cal (سرعة)}$$

وفي حالة  $R = 8.314$  جول مول<sup>-1</sup> مطلقة<sup>1</sup> فإن الشغل يصبح :

$$W_{\max} = -2.303 (1 \text{ mol}) (8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) (300.16 \text{ K}^\circ) \log \frac{100}{10}$$

$$= -5744.14 \text{ J (جول)}$$

وتدل الإشارة السالبة التي تسبق الشغل على أن الشغل انجز من قبل المنظومة على المحيط .

من الممكن في الواقع حساب الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز بصورة رجوعية ثابتة درجة الحرارة بدلالة الضغط بدلاً من الحجم . بما أن درجة الحرارة ثابتة في عملية التمدد وكذلك بالنسبة إلى عدد المولات ، لذا فإنه يصبح من الممكن كتابة المعادلة التالية :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

أو أن

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} \quad \dots\dots(2-17)$$

حيث  $P_1$  الضغط الابتدائي للغاز و  $P_2$  ضغطه النهائي و  $V_1$  و  $V_2$  كما عرفنا سابقاً .  
والآن بالتعويض عن المقدار  $(V_2/V_1)$  في المعادلة (2-16) بما يساويها في المعادلة (2-17) ينتج :

$$W_{\max} = -nRT \ln \frac{P_1}{P_2} = -2.303 nRT \log \frac{P_1}{P_2} \quad \dots\dots(2-18)$$

مثال (5) :

احسب الشغل المنجز نتيجة تمدد مول واحد من غاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة في درجة حرارة 27 ومن ضغط ابتدائي مقداره (10) جو الى ضغط نهائي يساوي (1) جو .

الحل

نعوض عن المقادير  $n$  و  $T$  و  $R$  و  $P_1$  و  $P_2$  في المعادلة (2-18) لنحصل على الشغل المنجز كما يلي :

$$W_{\max} = -1 \times 0.082 \times 300.16 \times \ln \frac{10}{1}$$
$$= -56.68 \text{ l. atm ( لتر جو )}$$

$$W_{\max} = -1 \times 8.139 \times 300.16 \ln \frac{10}{1} \quad \text{او}$$
$$= -5626.23 \text{ J. ( جول )}$$

$$W_{\max} = -1 \times 1.987 \times 300.16 \times \ln \frac{10}{1} \quad \text{او}$$
$$= -1373.55 \text{ Cal ( سعرة )}$$

اما في حالة تقلص غاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة فأن حساب الشغل يتم باستخدام المعادلة التالية :

$$W_{\min} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{.....(2-19)}$$

وهي نفس المعادلة (2-16) التي تستخدم لحساب الشغل المنجز في عملية تمدد غاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة، لكن باختلاف الإشارة. ان الشغل المستحصل من المعادلة (2-19) يمثل ادنى شغل ( $W_{\min}$ ) لازم لتقلص الغاز .

## 7-2 الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز بعملية لارجوعية ثابتة درجة الحرارة (Work done in an irreversible isothermal expansion)

تتم العمليات اللارجوعية عندما يتمدد الغاز مقابل ضغط خارجي مسطاً ( $P_{ext.}$ ) ويستخدم هذا الضغط عند حساب الشغل المنجز من قبل الغاز. وتحصل عملية التمدد هذه، بتحديد حالتى المنظومة الابتدائية والنهائية، من حجم ( $V_1$ ) وضغط داخلي ( $P_1$ ) الى حجم ( $V_2$ ) وضغط داخلي ( $P_2$ ) بحيث يصبح الضغط الاخير مساوياً الى الضغط الخارجى المسط ( اي ان  $P_{ext.} = P_2$  ) . ومتى ما يتحقق الشرط الاخير يمكن حساب الشغل في مثل هذه العمليات باستخدام المعادلة التالية :

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext.} dV \quad \dots (2-20)$$

وبما ان ( $P_{ext.}$ ) ثابت خلال عملية التمدد فيمكن اخراجه خارج التكامل وتعويضه بالضغط النهائي للغاز ( $P_2$ ) لتصبح المعادلة (20-2) كما يلي :

$$W_{irr} = - P_2 \int_{V_1}^{V_2} dV = - P_2 (V_2 - V_1) \quad (2-21)$$

يلاحظ للوهلة الاولى ان المعادلة (21-2) هي نفس المعادلة (10-2) لكن الواقع غير ذلك اذ ان المعادلة (21-2) هي لتمدد غاز في درجة حرارة ثابتة وتحت ضغط ثابت ، في حين ان المعادلة (10-2) هي لعملية لا تكون فيها درجة الحرارة ثابتة ، اذ انها تتغير اثناء عملية التمدد . كذلك يمكن حساب الشغل في عملية التمدد اللارجوعية بدلالة درجة الحرارة وكل من الضغطين  $P_1$  و  $P_2$  بالافادة من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية . فما ان الحجمين ( $V_1$ ) و ( $V_2$ ) محدودان في درجة حرارة ثابتة ( عملية ثابتة درجة الحرارة ) . لذا من الممكن التعبير عن ( $V_1$ ) بدلالة ( $P_1$ ) و ( $V_2$ ) بدلالة ( $P_2$ ) لتصبح المعادلة (21-2) كما يلي :

$$W_{irr.} = - P_2 \left( \frac{nRT}{P_2} - \frac{nRT}{P_1} \right) = - nRT \left( 1 - \frac{P_2}{P_1} \right) \quad \dots (2-22)$$

من الجدير بالذكر ان عملية تقلص غاز بعملية لارجوعية ثابتة درجة الحرارة وتحت ضغط ثابت هي عملية غير ممكنة بسبب ان الضغط ( القوة ) المضاد لحركة مكبس الاسطوانة هو ضغط الغاز نفسه داخل الاسطوانة ومن المحال ان يبقى ثابتاً خلال عملية التقلص ، وعليه لابد من استخدام الضغط المسلط عند حساب الشغل .

#### مثال (6)

احسب الشغل المنجز نتيجة تمدد مول واحد من غاز مثالي بعملية غير رجوعية ثابتة درجة الحرارة من حجم ( $V_1$ ) وضغط (10) جو الى حجم نهائي ( $V_2$ ) وضغط مقداره واحد جو ، غلماً ان درجة الحرارة . (27) م° والضغط الخارجي المسلط واحد جو .

#### الحل

اولاً: لحساب الشغل بدلالة الضغط لابد من استخدام المعادلة (22-2) . من المعلومات المعطاة في المثال فأن الشغل المنجز يساوي :

$$W_{irr.} = - nRT \left( 1 - \frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$= - (1)(0.082)(300.16) \left( 1 - \frac{1}{10} \right) = - 22.14 \text{ لتر جو}$$

واذا ما استخدمت القيمتان (1.987) سرعة مول  $1^{-1}$  مط  $1^{-1}$  و (8.31) جول مول  $1^{-1}$  مط  $1^{-1}$  لـ (R) في المعادلة اعلاه فأن الشغل الناتج يصبح (-536.49) سرعة و (-2243.7) جول على التوالي .

ثانياً : ولحساب الشغل بدلالة الحجم فأن ( $V_1$ ) و ( $V_2$ ) يمكن الحصول عليها من المعلومات المعطاة في المثال وذلك باستخدام معادلة الحالة العامة للغازات المثالية كما يلي :

يحسب  $V_1$  للحالة الابتدائية من المعادلة

$$P_1 V_1 = nRT$$

حيث ان  $P = 1$  جو و  $T = (273 + 27) = 300$  مط و  $n = 1$  مول وعليه

$$10 \times V_1 = 1 \times 0.082 \times 300$$

اذن

$$V_1 = 2.46 \text{ liter}$$

ويتم الحصول على  $V_2$  كالآتي :

$$P_2 V_2 = nRT$$

$$1 \times V_2 = 1 \times 0.082 \times 300$$

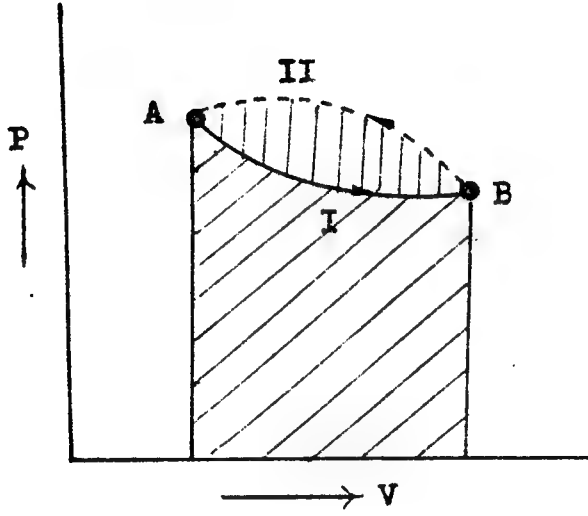
$$V_2 = 24.6 \text{ liter} \quad \text{لتر}$$

وعليه فان الشغل المنجز يساوي

$$\begin{aligned} W_{\text{irr}} &= - (1) (24.6 - 2.46) \\ &= -22.14 \text{ l. atm} \quad (\text{لتر جو}) \end{aligned}$$

## 8-2 الشغل المنجز في العمليات الدورية (Cyclic processes)

لنأخذ، على سبيل المثال، منظومة حالتها الابتدائية معروفة بـ (A) وقد عانت تغيراً في الضغط (P) والحجم (V) عند تحولها الى حالتها النهائية (B) عبر مسلك عُبر عنه بالمنحني (I) كما في الشكل (4-2). ان الشغل المنجز نتيجة هذا التغير في ضغط وحجم المنظومة عند تحولها من الحالة (A) والى (B) عبر المسلك (I) يساوي المساحة الواقعة تحت المنحني (I). ولرجوع المنظومة من الحالة (B) والى حالتها الابتدائية (A) فهناك مسلكان (II, I) يمكن ان يسلك اي منهما. في الواقع ان كل من المسلكين (I) و (II) يمثلان عملية دورية (Cyclic process) وهي التحولات. في المثال الذي لدينا فان هناك عمليتين دوريتين احدهما تتمثل في تحول المنظومة من (A) الى (B) عبر المسلك (I) ثم الرجوع الى (A) عبر نفس المسلك، والثانية تتمثل في تحول المنظومة من (A) الى (B) عبر المسلك (I) ثم الرجوع الى (A) عبر المسلك (II).



الشكل ( 4-2 )

ينسحب العملية الدورية (  $A \leftarrow B \leftarrow A$  ) عبر المسلك (I) بالعملية الدورية الأولى والعملية الدورية (  $A \leftarrow B \leftarrow A$  ) عبر المسلك (II) بالعملية الدورية الثانية .

في الواقع ان الشغل المنجز في عملية التحول من A الى B عبر المسلك (I) يساوي الشغل المنجز لعملية التحول من B الى A ويخالفه في الاشارة ، لذا فأن حصيلة الشغل المنجز في العملية الدورية الأولى يساوي صفراً . اما الشغل المنجز في العملية الدورية الثانية فإنه لايساوي صفراً ، ويمكن ملاحظة ذلك بالرجوع الى الشكل (4-2) ، ويساوي المساحة الواقعة بين المنحنيين I و II (اي الفرق بين الشغلين عبر المسلكين I و II) . وكمثال على ذلك عملية تمدد غاز بطريقة رجوعية ثابتة درجة الحرارة من A الى B عبر المسلك I ومن ثم تقلص الغاز من B الى A بطريقة رجوعية ثابتة درجة الحرارة عبر المسلك II .

## 9-2 الحرارة Heat

الحرارة ، كالشغل ، ليست شيء مادي ، بل انها شكل من اشكال الطاقة وهي الطاقة المنقولة بين منظومتين تحتلفان في درجة حرارتهما . وكما ان الشغل يمثل طريقة لانتقال الطاقة من منظومة لآخرى فإن الحرارة تمثل ، كذلك ، طريقة لانتقال

الطاقة من منظومة لآخرى شريطة اختلاف درجة حرارتها. ويمكن تلخيص الفروقات بين الشغل والحرارة كما يلي :

الشغل	الحرارة
1 — انتقال الطاقة بين المنظومة ومحيطها أو منظومة أخرى عبر ارتباط ميكانيكي.	1 — يتم انتقال الطاقة بين منظومتين عن طريق اتصاهما أو عن طريق الاشعاع.
2 — يمكن تحويله كلياً الى حرارة	2 — لايمكن تحويلها كلياً الى شغل
3 — اضافة الحرارة الى منظومة تزيد من الحركة العشوائية لجزيئاتها	3 — الشغل يؤدي الى حركة منظمه لمحتويات المنظومة.

ان الاختلاف بين درجتى حرارة منظومتين يكون بمثابة القوة الدافعة لانتقال الحرارة بينها ويستمر هذا الانتقال الى ان تصل المنظومتان الى حالة توازن حراري. وتعتمد كمية الحرارة على عوامل عديدة منها التغير في درجة الحرارة والسعة الحرارية (Heat Capacity) ويقاس مقدار التغير في الحرارة باستخدام المساعر المختلفة الانواع والاشكال.

هناك العديد من الدراسات والنتائج حول علاقة الشغل الميكانيكي بالحرارة لكن اهمها هي تلك التي حصل عليها جي بي جول (J. P. Joule) حوالي عام (1840) اذ تمكن من قياس مقدار الحرارة الناتجة من تحول كمية معلومة من شغل الى حرارة، وتوصل الى الاستنتاج الذي ينص على ان مقدار الحرارة الناتجة، من مقدار معين من الشغل، لايعتمد على نوع او اصل الشغل فيما لو كان شغلاً ميكانيكياً او كهربائياً او غيرها. ويعتبر هذا الاستنتاج اساس موضوع المكافئ الميكانيكي للحرارة (Mechanical Equivalent of Heat)، اي ان هناك نسبة ثابتة (definite) بين مقدار الشغل المصروف ومقدار الحرارة الناتجة منه.

بما انه يمكن تحويل مقدار معين من الشغل الى مقدار معين من الحرارة لذا فأن كلا من الشغل والحرارة يجب ان يكونا مظهران لنفس الشيء الا وهو الطاقة، وعليه فمن البديهي ان يشمل قانون حفظ الطاقة الحرارة والشغل مع باقي اشكال

الطاقة في المجموع الكلي للطاقة المحفوظة. وكما هو الحال بالنسبة للشغل فإن الحرارة تعتمد، كذلك على الأسلوب الذي انجز به التغير للتحويل في الحالة الابتدائية وإلى الحالة النهائية كأن يكون تغيراً كظيماً أو تحت درجة حرارة ثابتة أو غيرهما. لهذا السبب يعتبر تفاضل الحرارة ( $dq$ ) وتفاضل الشغل ( $dw$ ) تفاضلاً تاماً (Exact Differential)، بل إن كل منهما عبارة عن تفاضل غير تام (Inexact Differential) لأن قيم تكاملها الخطي تعتمد على الأسلوب الذي اتبع لإنجاز التغير بالإضافة إلى نقطتي البداية والنهاية لذلك التحويل كما ذكر سابقاً في موضوع الشغل.

بالنسبة إلى الإشارة التي تسبق ( $q$ ) فإن الإشارة الموجبة تعني الحرارة الممتصة من قبل المنظومة، في حين الإشارة السالبة التي تسبق ( $q$ ) تعني الحرارة المفقودة من قبل المنظومة.

## 10.2 حفظ الطاقة والقانون الأول للدينامية الحرارية (Conservation of Energy and the first Law of Thermodynamics)

إن الاختفاق في بناء ماكينة يمكن أن تعطي باستمرار شغلاً من دون اللجوء إلى تزويدها بطاقة من مصدر خارجي أو دون أن تعاني نفسها أي تغيير أدى إلى قبول فكرة عدم إمكانية إنتاج طاقة من نوع معين دون اختفاء مقدار مكافئ من طاقة من شكل آخر، أي عدم إمكانية الحصول على الحركة الأبدية من النوع الأول. (Perpetual motion of the first kind)

إن هذا الاختفاق للحصول على الحركة الأبدية إضافة إلى ظاهرة تكافؤ الشغل والحرارة أدت إلى استنباط قانون حفظ الطاقة الذي يطلق عليه بالقانون الأول للدينامية الحرارية الذي ينص على أن المجموع الجبري لكل التغيرات الطاقية في مجموعة معزولة يساوي إلى صفر، أي أن هناك الطاقة الكلية لمنظومة معزولة تكون ثابتة ولو أنه من المحتمل أن تكون هناك تحولات طاقية من شكل لآخر. معنى هذا أن أي تغير في طاقة منظومة يجب أن يقابله تغير مكافئ بالاتجاه المعاكس في طاقة المحيط. وليس من الضروري أن يكون التغير في نفس الشكل من الطاقة إذ أنه يمكن أن يكون في أكثر من شكل واحد لكن يجب أن تكون مقادير التغيرات الطاقية



متكافئة في المنظومة والمحيط. الذي يفهم مما تقدم ان هناك عملية تعويض طاقية بين المنظومة والمحيط بحيث يكون التغير في الطاقة الكلية لها مساو الى صفر. في الحقيقة ان صلاحية وعمومية القانون الاول تأتي من توافق النتائج العملية مع القانون المنصوص اعلاه.

قبل كتابة الصيغة الرياضية للقانون الاول للدينامية الحرارية فمن الضروري التكلم بعض الشيء عن الطاقة الداخلية (Internal Energy) للمنظومة التي يرمز لها بالحرف  $U$ . والطاقة هي عبارة عن دالة للطبيعة الكيميائية للمادة ودرجة حرارتها، وأحياناً ضغط وحجم المنظومة، لذا فهي الطاقة التي تمتلكها المنظومة والتي تشمل الطاقة الانتقالية والاهتزازية والدورانية للجزيئات وطاقة الاوصار والالكترونات والنوى والذرات. اي ان الطاقة الداخلية هي صفة مميزة للمنظومة. ومن خواص الطاقة الداخلية لمنظومة كمنها دالة حالة، بمعنى اخر ان قيمتها تعتمد على حالة المنظومة وليس على ماضيها وعلى ماكانت عليه، لذا فإن التغير في الطاقة الداخلية  $(\Delta U)$  للمنظومة لايعتمد على الاسلوب الذي اتبع لانجاز ذلك التغير، بل يعتمد على الحالة الابتدائية والحالة النهائية لها، لذلك فإن  $(dU)$  يعتبر تفاضلاً تاماً. وان التغير في الطاقة الداخلية  $(\Delta U)$  منظومة عند تحولها من الحالة الابتدائية (A) الى الحالة النهائية (B) تساوي:

$$\Delta U = U_B - U_A \quad \dots(2-23)$$

ان مقدار التغير الذي يحصل للطاقة الداخلية  $(\Delta U)$  لمنظومة مغلقة، على سبيل المثال، يحدده مقدار الشغل المنجز من قبل المنظومة او الشغل المنجز عليها اضافة الى مقدار الحرارة الذي تشعه او تمتصه المنظومة. اي ان مقدار التغير في الطاقة الداخلية يساوي مقدار الشغل مضافاً اليه مقدار الحرارة. فعندما تقوم المنظومة بالشغل فإن طاقتها الداخلية تقل بنفس مقدار الشغل الذي انجزته، في حين تزداد طاقتها الداخلية بنفس مقدار الشغل الذي ينجز عليها. وعندما تضاف حرارة الى منظومة فإن طاقتها الداخلية تزداد بنفس مقدار الحرارة المضافة وفي حالة سلب مقدار معين من الحرارة من منظومة فإن طاقتها الداخلية تقل بنفس مقدار الحرارة المسلوطة.

\* في بعض المصادر والكتب يستخدم الحرف (E) للدلالة على الطاقة الداخلية لمنظومة.

لنتصور الآن منظومة انجز عليها شغل مقداره (dw) واضيفت اليها حرارة مقدارها (dq)، ففي هذه الحالة تكتسب طاقة مقدارها (dw)، بسبب الشغل المنجز عليها، اضافة الى طاقة مقدارها (dq)، بسبب الحرارة المنقولة اليها. اي ان مقدار الزيادة الحاصلة في طاقة المنظومة تساوي الى (dw + dq). ان هذه الزيادة في طاقة المنظومة وفقاً للقانون الاول للدينامية الحرارية تساوي الى مقدار الزيادة الحاصلة في الطاقة الداخلية للمنظومة (dU)، اي ان

$$dU = dq + dw \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

أو

$$\Delta U = q + w \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

وتمثل اي من المعادلتين (2 - 24) و (2 - 25) التعبير الرياضي للقانون الاول، حيث (ΔU) مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية للمنظومة، (q) مقدار الحرارة المضافة و (W) مقدار الشغل المنجز على المنظومة. يمكن استنتاج اشارة كل من الشغل والحرارة من المعادلة (2-25). من الضروري ان نؤكد بأن الحرارة المضافة (او الممتصة) تزيد من الطاقة الداخلية للمنظومة. وان الشغل المنجز على المنظومة يزيد من طاقتها الداخلية، لذا تكون اشارة (ΔU) موجبة. بينما الحرارة المسلوقة (او المشعة) من المنظومة تقلل من طاقتها الداخلية وكذا الحال بالنسبة للشغل الذي تقوم به المجموعة، وعليه تكون اشارة (ΔU) سالبة.

كما بينا سابقاً ان كلا من (dq) و (dw) يمثلان تفاضلاً غير تام لكن وفق القانون الاول. فأن المقدار (dq - dw) والمعرف بـ (dU) يعتمد على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للمنظومة ولا يعتمد على الاسلوب الذي تم به التغير، وهذا يعني ان المقدار (dq - dw) يجب ان يكون تفاضلاً تاماً اي انه يساوي الى تفاضل دالة الحالة للمنظومة. ودالة الحالة هذه هي الطاقة الداخلية (U) للمنظومة وتفاضلها (dU) هو تفاضل تام. فلعلمية دورية ووفقاً للقانون الاول للدينامية الحرارية ( قانون حفظ الطاقة )، ان التغير في الطاقة الداخلية (ΔU) يساوي صفر، وعليه فأن المقدار (q + w) لهذه العملية يجب ان يساوي صفرًا ولو ان قيمتها تعتمدان على الاسلوب الذي اتبع لانجاز التحولات. في الواقع ان فائدة القانون الاول لا تنحصر على ان dU تساوي الى (dq + dw) فقط فليس في ذلك شيء جديد اذ ان dU تقاس بمقدار التغير في (dq) و (dw) لكن جوهر القانون الاول يمكن في اختلاف خواص

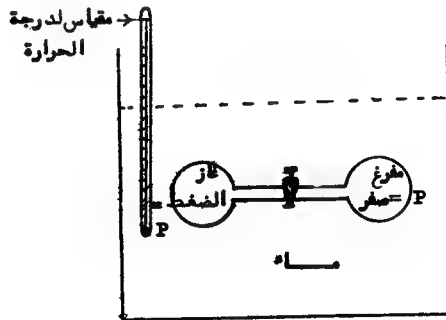
التفاضل  $dU$  مقارنة مع  $(dq)$  و  $(dw)$ . والقانون الاول للدينامية الحرارية قد عرف موضوع الطاقة بدلالة الشغل والحرارة وبين ان الطاقة الداخلية هي صفة دينامية حرارية بعكس الشغل والحرارة. اضافة الى ماتقدم فان  $q$  و  $W$  و  $U$  هي كميات يمكن قياسها تجريبياً، في حين ان القيمة المطلقة للطاقة الداخلية ( $U$ ) لا يمكن تعيينها. ان التغير في الطاقة الداخلية للمنظومة نتيجة تحولها من حالة الى اخرى هو الذي يمكن تعيينه فقط.

## 11.2 الطاقة الداخلية لغاز مثالي — تجربة جي . بي . جول

(J. p. Joule)

اجرى جول عام (1944) تجربة حول تمدد غاز مقابل ضغط مقداره صفر ( $P = \text{صفر}$ ) وذلك باستخدام انائين يفصلهما صمام وضع في احدهما غاز تحت ضغط معين وفرغ الثاني، حيث كان الضغط فيه صفراً تقريباً. وبعد غمر الانائين مع الصمام في حمام مائي يمكن قراءة التغير في درجة حرارته بواسطة محرار. كما في الشكل (5-2). وبعد فتح الصمام وتمدد الغاز الى الاناء المفرغ، لاحظ جول ان درجة حرارة الماء المحيط بالانائين لم تتغير (اي ان  $\Delta T = \text{صفر}$ ). ان عدم حصول اي تغير في درجة حرارة الماء تعني انه لم يحدث انتقال حرارة الى المحيط جراء هذه العملية، اي ان ( $q$ ) يجب ان تساوي صفراً. وبما ان تمدد الغاز كان مقابل ضغط مساو الى صفر، لذا فان الشغل يجب ان يساوي الى صفر، كذلك ( $W = P dv$ ) وبالنسبة فان  $Oxdv = O$

$$\Delta U = q + W = 0 + 0 = 0 \quad \dots (2-26)$$



الشكل (5-2)

اي انه لم يحدث تغيير في الطاقة الداخلية للمنظومة نتيجة هذه العملية . في الواقع ان التغير في درجة الحرارة ( $\Delta T$ ) يساوي الى صفر فقط في حالة الغازات المثالية ، لكن في حالة الغازات الحقيقية المفروض ان ( $\Delta T$ ) لا تساوي الى صفر ( ان عدم تمكن جول من ملاحظة اي تغير في درجة الحرارة يرجع في الواقع الى السعة الحرارية العالية للماء نسبة للسعة الحرارية للهواء ، حيث يتعذر قياس الفروقات القليلة في درجة الحرارة ) ، اي ان ( $q$ ) لا تساوي صفراً وتكون لها قيمة معينة . وكلما اقترب سلوك الغاز من السلوك المثالي اقتربت قيمة ( $q$ ) من الصفر ، لذا فقط في حالة التمدد الحر للغاز المثالي تكون قيمة ( $q$ ) مساوية الى الصفر . ان الطاقة الداخلية للغاز في هذه الحالة تعتمد على متغيرين هما الحجم ( $v$ ) ودرجة الحرارة ( $T$ ) . اي ان

$$U = f(T, v)$$

وتفاضل هذه المعادلة يعطي :

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v dT \quad \dots(2-27)$$

وفي حالة تمدد غاز مقابل ضغط مساو الى صفر فإن التغير في الطاقة الداخلية للغاز يساوي صفر ، وعليه تصبح المعادلة (27-2) كما يلي :

$$dU = 0 = \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v dT \quad \dots(2-29)$$

وكما بينا اعلاه فإن ( $dT$ ) لهذه العملية يساوي صفر ، لذلك فإن المعادلة (28-2) تختزل الى .

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T dv = 0 \quad \dots(2-29)$$

بما ان هناك تمدد في حجم الغاز ، لذا فإن ( $dv$ ) لا يمكن ان يساوي صفر ولذلك فيجب ان يكون :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T = 0 \quad \dots(2-30)$$

ان الذي يمكن استنتاجه من المعادلة (30-2) هو ان الطاقة الداخلية

للمنظومة لا تعتمد على التغير في الحجم (V) عند ثبات درجة الحرارة (T). هذا وان صلاحية المعادلة (2-30) تكون قائمة فقط في حالة ان  $(\Delta T)$  تساوي صفر، ولا يحدث ذلك الا في حالة الغاز المثالي. في الحقيقة ان الطاقة الداخلية (U) لغاز مثالي، كذلك، لا تعتمد على الضغط عند ثبات درجة الحرارة، اي ان:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = 0 \quad \dots(2-31)$$

ان صحة المعادلتين (2-30) و (2-31) بالنسبة للغازات المثالية يعزى الى احدى فرضيات النظرية الحركية الجزيئية للغازات المثالية والتي تنص على انعدام قوى التجاذب والتنافر بين الجزيئات مهما اختلفت المسافات الفاصلة بينها. لذلك لا تتغير الطاقة الداخلية للغاز المثالي بتغير الضغط والحجم عند ثبات درجة الحرارة، بينما وجود مثل هذه القوى بين جزيئات الغاز الحقيقي يجعلها تعتمد على ضغط او حجم الغاز عند ثبات درجة الحرارة، ولهذا السبب فان المعادلتين (2-30) و (2-31) تعد كل منهما كأحد المعايير لسلوكية الغاز المثالي.

## 12.2 الطاقة الداخلية لعملية تحت حجم ثابت $(\Delta U)$ والحرارة تحت حجم ثابت $(q_v)$

في حالة تمدد غاز مقابل ضغط خارجي  $(P_{ext})$  فإن المعادلة (2-24) تصبح:

$$dU = dq + P_{ext} dv \quad \dots(2-32)$$

واذا كانت تحت حجم ثابت فان التغير في الحجم  $(dv)$  يصبح صفراً (اي  $dv = 0$ ) والمقدار  $pdv$  يكون مساوياً الى صفر، وعليه تصبح المعادلة (2-32) كما يلي:

$$dU = dq_v \quad \dots(2-33)$$

حيث  $q$  تمثل الحرارة الممتصة تحت حجم ثابت . وعند تكامل المعادلة (2-33) نحصل على :

$$U_2 - U_1 = \Delta U = q_v \quad (2-34)$$

يتبين من ذلك ان التغير الحاصل في الطاقة الداخلية ( $\Delta U$ ) لمنظومه لا تقوم بشغل يساوي الى مقدار الحرارة الممتصة او المفقودة ( $q_v$ ) . ويفاد من المعادلة (2-34) في حساب التغير في طاقة التفاعلات الكيميائية التي تجري تحت حجم ثابت وذلك من قياس التغير في الحرارة ، ويستخدم لهذا الغرض مسعر خاص يعرف بمسعر الاحتراق Bomb Calorimeter .

### 13.2 الانثالية (H) Enthalpy

لنحاول الان معرفة التغير الحراري الذي يصاحب العمليات التي تجري تحت ضغط ثابت والتي هي حال معظم التفاعلات الكيميائية التي تجري مفتوحة للضغط الجوي ، حيث يعتبر عنا الضغط المسلط ضغطاً ثابتاً ومساوياً الى الضغط الجوي . لنصور الان منظومة ( غاز ) تحت ضغط ثابت وان الشغل الوحيد الذي يمكن ان تقوم به المنظومة هو من نوع الشغل ( $P \Delta V$ ) الحاصل نتيجة تغير في الحجم . ان الشغل المنجز ( $dw$ ) نتيجة تمدد المنظومة من حجم ابتدائي ( $V_1$ ) الى حجم نهائي ( $V_2$ ) تحت ضغط ثابت ( $P$ ) يساوي الى :

$$dw = - \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

بما ان ( $P$ ) مقدار ثابت فإن تكامل المعادلة اعلاه يعطي المعادلة التالية :

$$w = - P (V_2 - V_1)$$

وعليه فإن المعادلة (2-25) تصبح بعد اعادة ترتيبها كما يلي :

$$q_p = (U_2 - U_1) + P (V_2 - V_1) \quad \dots(2-35)$$

حيث ( $q_p$ ) تمثل مقدار الحرارة الممتصة تحت ضغط ثابت و  $U_1$  و  $U_2$  الطاقة الداخلية الابتدائية والنهائية للمنظومة على التوالي . وبأعادة كتابة المعادلة (2-35) نحصل على :

$$q_p = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) \quad \text{.....(2-36)}$$

كما ذكرنا ان  $P$  ،  $V$  و  $U$  تمثل دوال حالة ، لذا فإن المقدار ( $U + PV$ ) دالة حالة كذلك ويرمز له بالحرف ( $H$ ) ويعرف بالانثالية . اي ان :

$$H = U + PV \quad \text{.....(2-37)}$$

وعليه تصبح المعادلة (2-36) ، بعد استعويض عن المقدار ( $U_1 + PV_1$ ) بالدالة ( $H_1$ ) والمقدار ( $U_2 + PV_2$ ) وبالدالة ( $H_2$ ) ، كما يلي :

$$q_p = H_2 - H_1 = \Delta H \quad \text{.....(2-38)}$$

او

$$dq_p = dH \quad \text{.....(2-39)}$$

$H_1$  و  $H_2$  تمثلان انثالية المنظومة في الحالة الابتدائية والنهائية على التوالي . يتضح مما تقدم ان التغير في انثالية منظومة ( $\Delta H$ ) عند تحولها من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية يساوي الى مقدار الحرارة الممتصة او المنبعثة تحت ضغط ثابت شريطة ان يكون الشغل المنجز هو من نوع ( $P\Delta V$ ) فقط .

استناداً الى ماتقدم فقد حصلنا على مقياس تجريبي للتغير الحراري الذي يحصل تحت ضغط ثابت ، وهذا المقياس هو الانثالية التي هي عبارة عن دالة دايمنية حرارية جديدة تعتمد قيمتها على الحالة الابتدائية والنهائية للمنظومة ، اي انها كما ذكرنا دالة حالة .

الآن اذا اجرينا تفاضلاً على المعادلة (2-37) فسنحصل على :

$$dH = dU + PdV + Vdp \quad \text{.....(2-40)}$$

لايجاد التغير في الانثاليبي (H) نتيجة التحول من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية نجرى تكامل المعادلة (40-2)، وبما ان العملية تحت ضغط ثابت (اي  $dP = 0$ ) فان المقدار  $VdP$  يصبح صفراً وبذا تختصر المعادلة (40-2) الى

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{U_1}^{U_2} dU + \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad \text{.....(2-41)}$$

$$\Delta H = \Delta U + P \Delta V \quad \text{.....(2-42)}$$

وباعادة ترتيب المعادلة (42-2) نحصل على

$$\Delta H - \Delta U = P \Delta V \quad \text{.....(2-43)}$$

او

$$q_p - q_v = P \Delta V \quad \text{.....(2-44)}$$

اي ان الفرق بين الحرارة الممتصة تحت ضغط ثابت والحرارة الممتصة تحت حجم ثابت وفقاً للمعادلتين (43-2) و (44-2) يساوي الشغل المنجز ( $P \Delta V$ ). وبما ان الانثالية هي دالة حالة، فعليه:

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad \text{....(2-45)}$$

حيث ( $H_1$ ) الانثالية في الحالة الابتدائية و ( $H_2$ ) الانثالية في الحالة النهائية، ومن المعادلتين (45-2) و (37-2) نحصل على المعادلة التالية:

$$\Delta H = (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1)$$

وباعادة ترتيبها ينتج

$$\Delta H = (U_2 - U_1) + (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

او

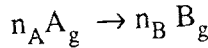


$$\Delta H = \Delta U + P_2 V_2 - P_1 V_1 \quad \text{.....(2-46)}$$

في حالة ثابت الضغط ، اي ان  $P = P_2 = P_1$  ، فإن المعادلة (2-46) تختصر الى المعادلة (2-42) ، على اعتبار ان  $V_1 - V_2 = \Delta V$  ، وبواسطتها يحسب  $\Delta H$  لعملية تحت ضغط ثابت. لكن في الظروف التي لا تكون تحت ضغط ثابت ، اي ان  $P_2 \neq P_1$  ، فإن  $(\Delta H)$  لا زال لها قيمة معينة وفي هذه الحالة تحسب قيمتها بواسطة المعادلة (2-46). كذا الحالة بالنسبة الى  $\Delta U$  فإن لها قيمة معينة ايضاً في العمليات التي لا تكون تحت حجم ثابت. فقط تحت ضغط ثابت فإن  $\Delta H$  تساوي الى  $\sigma_v$  و  $\Delta U$  تساوي الى  $q_v$  تحت حجم ثابت.

في حالة المواد الصلبة والسائلة التي لاتعاني تغيراً ملحوظاً في الحجم ، فإن  $(\Delta H)$  و  $(\Delta U)$  ، تكون لها قيم متشابهة جداً للعمليات التي تشمل على مثل هذه المواد ، لأن بالنسبة للعمليات التي تشمل على غازات فإن قيمة  $\Delta H$  تختلف عن قيمة  $\Delta U$  والفرق بينهما معطى بالمعادلة (2-43).

في حالة التفاعلات الغازية التي تتضمن تغيراً في عدد مولات الغازات نتيجة للتفاعل ، وكمثال على ذلك التفاعل النظري التالي :



حيث A يمثل المادة المتفاعلة في الحالة الغازية كما يدل الحرف (g) ( الحرف الاول من الكلمة gas التي تعني غاز ) الواقع عند اسفل الحرف A من الجهة اليمنى ، و  $n_A$  عدد مولات المادة A ، B يمثل المادة الناتجة في الحالة الغازية و  $n_B$  عدد مولاتها. فعند ثبات الضغط ودرجة الحرارة ووفقاً للمعادلة العامة للغازات المثالية فإن :

$$P V_A = n_A RT \quad \text{....(2-47)}$$

و

$$P V_B = n_B RT \quad \text{...(2-48)}$$

وبطرح المعادلة (2-47) من المعادلة (2-48) ينتج :

$$P V_B - P V_A = n_B RT - n_A RT$$

او  
....(2-49)

$$P \Delta V = \Delta n RT$$

حيث  $\Delta V$  التغير في الحجم و  $\Delta n$  التغير في عدد المولات للتفاعل الغازي . والان بالتعويض عن  $(P \Delta V)$  في المعادلة (2-43) بما يساويها من المعادلة (2-49) نحصل على :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n RT \quad \text{....(2-50)}$$

او

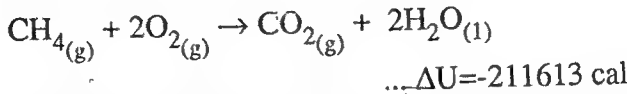
$$q_p = q_v + \Delta n RT \quad \text{....(2-51)}$$

مثال (7)

اذا علمت ان حرارة الاحتراق لغاز الميثان ( $CH_4$ ) تحت حجم ثابت . مقاسة بالمسعر ، تساوي الى (-211613) سعرة / مول في درجة حرارة 25°م احسب حرارة التفاعل تحت ضغط ثابت ( $\Delta H$ ) للتفاعل في نفس درجة الحرارة .

الحل

يجب ان نكتب قبل كل شيء المعادلة المتعادلة لاحتراق غاز الميثان بواسطة غاز الاوكسجين . فاحتراق اية مادة هايدروكربونية احتراقاً تاماً يعطي غاز ثاني اوكسيد الكربون وماء . وعليه فأن المعادلة المتعادلة لاحتراق غاز الميثان بالاوكسجين تكون :



حيث الحرف (I) يدل على ان المادة في الحالة السائلة ( الحرف l من الكلمة (Liquid) التي تعني سائل ) . لذا فأن المواد المبينة في المعادلة اعلاه التي هي في الحالة الغازية هي ( $CH_4$ ) ، ( $O_2$ ) و ( $CO_2$ ) في حين ان ( $H_2O$ ) هو في الحالة السائلة ، وعليه فأن التغير في عدد المولات ( $\Delta n$ ) نتيجة الاحتراق التام لمول واحد من الميثان في المعادلة المتعادلة يساوي الى :

$$\Delta n = n_{\text{CO}_2} - (2n_{\text{O}_2} + n_{\text{CH}_4}) = 1 - 2 - 1 = -2$$

اصبح الان من الممكن حساب  $(\Delta H)$  للتفاعل اعلاه وذلك باستخدام المعادلة (50-2) والتعويض عن قيمتي  $(\Delta U)$  و  $(T)$ .

من المفيد ان نذكر ان قيمة  $(\Delta U)$  المعطاة في المثال هي للاحتراق التام لمول واحد من الميثان ، وعليه فأن :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n RT$$

$$\Delta H = -211613 + (-2 \text{ mol}) (1.987 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(298.16^\circ \text{ K})$$

$$\Delta H = -212798 \text{ cal / mol}$$

$$= -212.798 \text{ kcal / mol}$$

يلاحظ ان قيمة  $(\Delta H)$  المستحصلة هي لاحتراق مول واحد من غاز الميثان ايضاً .

لقد ذكرنا انفاً ان تساوي  $(\Delta H)$  و  $(q_p)$  ، المعادلة (38-2) ، يكون فقط للعمليات التي تتم تحت ضغط ثابت . وعليه اذا فقدت المنظومة حرارة  $(q_p)$  فأن قيمة  $(\Delta H)$  تصبح مقداراً سالباً ، وهذا يعني ان  $(H_1)$  تكون اكبر من  $(H_2)$  ، المعادلة (38-2) . بصورة عامة ان العمليات التي تكون فيها  $(q_p)$  و  $(\Delta H)$  مقدارين سالبين فيطلق عليها بالعمليات الباعثة للحرارة (exothermic) . اما في حالة ان  $(\Delta H)$  و  $(q_p)$  يحملان الاشارة الموجبة فتعرف مثل هذه العمليات بالعمليات الماصة للحرارة (endothermic) .

## 14.2 السعة الحرارية (C) Heat Capacity

من المعلوم انه عند جلب جسمين مختلفين في درجتَي حرارتهما في حالة تماس مع بعضهما الاخر تنتقل الحرارة من احد الجسمين الى الاخر مسببة تغيراً في درجة حرارة الجسم الذي انتقلت اليه . في الحقيقة ان مقدار الحرارة التي يمتصها جسم ( في اية درجة حرارة غير درجة حرارة انصهاره او تبخره .... الخ ) تتناسب مع التغير في درجة الحرارة . فاذا فرضنا ان انتقال مقدار  $(dq)$  من الحرارة الى جسم ادت الى تغير درجة حرارته بمقدار  $dT = T_2 - T_1$  فأن

$$dq \propto dT \quad \dots (2-52)$$

$$dq = C dT = C (T_2 - T_1) \quad \dots(2-53)$$

حيث  $C$  ثابت التناسب ويعرف بالسعة الحرارية لذلك الجسم ويتناسب مع كتلة المادة التي تعاني التغير في درجة الحرارة. ويطلق على السعة الحرارية للغرام الواحد بالحرارة النوعية وللمول الواحد من المادة بالسعة الحرارية المولارية. من المعادلة (2-53) تكون:

$$C = \frac{dq}{dT}$$

يلاحظ من المعادلة (2-54) كيف ان السعة الحرارية ( $C$ ) تعتمد على درجة الحرارة، لذلك فإن قيمة ( $C$ ) لا تبقى ثابتة على مدى كبير من درجة الحرارة. وعليه فلتعريف ( $C$ ) فإن من الضروري ان يكون ( $dT$ ) صغير، اي ان قيمة  $T_2$  تقترب من قيمة  $T_1$ ، والافان قيمة ( $C$ ) لا تبقى ثابتة عندما تكون قيمة  $T_2$  اكبر بكثير من قيمة  $T_1$ .

بما ان كمية الحرارة الممتصة او المنبعثة ( $q$ ) تعتمد على الاسلوب الذي اجري به التغير ولا تعتمد على الحالة الابتدائية والنهائية للمنظومة، وان تعريف السعة الحرارية يكون في درجة حرارة ( $T$ )، لذا فإن قيمة السعة الحرارية ستعتمد، كذلك، على الاسلوب الذي انجز به التغير كأن تكون العملية قد اجريت تحت حجم ثابت او ضغط ثابت.

السعة الحرارية تحت حجم ثابت ( $C_v$ ):

عند اجراء عملية تحت حجم ثابت يرمز للسعة الحرارية بالرمز ( $C_v$ ) وللحرارة الممتصة بالرمز ( $q_v$ ). وبذلك تكتب المعادلة (2-54) كما يلي:

$$C_v = \frac{dq_v}{dT} \quad \dots(2-55)$$

وبما ان العملية اجريت تحت حجم ثابت فإن المعادلة (2-33) تنص على ان:

$$dq_v = dU_v \quad \dots(2-33)$$

وعليه تصبح المعادلة (2-55)

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (2-56)$$

او ان

$$\int_{U_1}^{U_2} dU = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad \dots(2-57)$$

فاذا كانت قيمة ( $C_v$ ) ثابتة على مدى درجات الحرارة فإن تكامل المعادلة (2-57) يعطي

$$U_2 - U_1 = \Delta U = C_v \Delta T \quad \dots(2-58)$$

يلاحظ من المعادلة (2-58) ان ( $C_v$ ) تعبر عن معدل تغير الطاقة الداخلية مع درجة الحرارة تحت حجم ثابت. ويفاد من المعادلة (2-57) في حساب التغير في الطاقة الداخلية لمنظومة من سعتها الحرارية تحت حجم ثابت وعلى مدى من درجات الحرارة.

السعة الحرارية تحت ضغط ثابت ( $C_p$ ):

يرمز للسعة الحرارية تحت ضغط ثابت بالرمز ( $C_p$ ) وعليه تصبح المعادلة (2-54) كالآتي:

$$C_p = \frac{dq_p}{dT} \quad \dots(2-59)$$

ولعملية تحت ضغط ثابت فإن المعادلة (2-39) تشير الى ان

$$dq_p = dH_p$$

وعليه تصبح المعادلة (2-59) كما يلي:

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad \dots(2-60)$$

او ان

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \dots(2-61)$$

واذا اعتبرنا ان (Cp) لا تتغير على مدى درجات الحرارة المعطاة فإن تكامل المعادلة (61-2) يعطي

$$H_2 - H_1 = \Delta H = C_p \Delta T \quad (2-62)$$

يلاحظ ان (Cp)، وفقاً للمعادلة (60-2)، تعبر عن معدل تغير الانثالبية مع درجة الحرارة تحت ضغط ثابت. وان المعادلة (62-2) تستخدم في حساب (ΔH) للمنظومة على مدى من درجات الحرارة وذلك من قيمة (Cp) للمنظومة. من المعادلتين (39-2) و (41-2) فإن :

$$dH = dq_p = dU + P dV \quad \dots(2-63)$$

وبتعويض المعادلة (63-2) في المعادلة (60-2) ينتج ان :

$$C_p = \frac{dU + P dV}{dT} \quad \dots(2-64)$$

وعندما تكون عملية امتصاص الحرارة تحت ضغط ثابت وبصورة رجوعية فانه يمكن كتابة المعادلة (64-2) كالآتي :

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \dots(2-65)$$

ويتفاضل المعادلة (37-2) مع (T) بثبوت (P) نحصل على :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \dots(2-66)$$

ومن المعادلتين (65-2) و (66-2) نحصل على المعادلة (60-2) التي تعطي التعريف الدينامي الحراري للسعة الحرارية تحت ضغط ثابت.

في كثير من الاحيان تفرض في حسابات الدينامية الحرارية فإن الضرورة تحويل احد السعتين الحراريتين الى الاخرى، كأن يكون إيجاد قيمة (Cv) من قيمة (Cp) او العكس. لذلك من الضروري معرفة الفرق بين (Cp) و (Cv) وللتوصل الى ذلك نطرح المعادلة (56-2) من المعادلة (60-2) لنحصل على :

$$C_p - C_V = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \quad \dots(2-67)$$

وبالتعويض عن (H) بما يساويها من المعادلة (37-2) تصبح المعادلة (67-2) كما يلي :

$$C_p - C_V = \left[\frac{\partial(U + PV)}{\partial T}\right]_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \quad \dots(2-68)$$

والتي تعطي المعادلة :

$$C_p - C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \quad \dots(2-69)$$

بما ان المتغيرات التي يمكن ان تصف (U) هي P و V و T ، لكن ثبات احدها كالضغط مثلاً فيمكن كتابة (U) كدالة لـ (T) و (V) كما يلي :

$$U = f(V, T)$$

وبتفاضل المعادلة ينتج :

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV \quad \dots(2-70)$$

الان اذا قسمنا طرفي المعادلة (70-2) على dT وافترض حالة ثبوت الضغط نحصل على :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (2-71)$$

وبالتعويض عن  $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P$  في المعادلة (69-2) بما يساويها من المعادلة (71-2) تنتج المعادلة التالية :

$$C_p - C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \quad \dots(2-72)$$

والتي تختصر الى :

$$C_p - C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \dots(2-73)$$

من تجربة جول لغاز مثالي فإن المقدار  $(\frac{\partial U}{\partial V})_T$  يساوي صفراً. وعليه فإن الحد الأول من الطرف الايمن للمعادلة (2-73) يصبح مساوياً الى صفر وبذا تصبح المعادلة

(2-73) كما يلي :

$$C_p - C_v = P \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad \dots(2-74)$$

وبالافادة من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية :

$$PV = nRT$$

واجراء التفاضل عليها بالنسبة الى (T) بثبوت الضغط فأنتا نحصل على :

$$P \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = nR \quad \dots(2-75)$$

وبتعويض المعادلة (2-75) في المعادلة (2-74) ينتج ان :

$$C_p - C_v = nR \quad \dots(2-76)$$

ولمول واحد من الغاز فإن :

$$C_p - C_v = R \quad \dots(2-77)$$

( لتمييز بين السعة الحرارية لعدد من المولات من تلك للمول الواحد توضع فتحة على السعة الحرارية للمول الواحد مثل  $\bar{C}_v$  و  $\bar{C}_p$ . بالنسبة الى وحدات السعة الحرارية المولية فهي جول مول<sup>-1</sup> مط<sup>-1</sup> او سعرة مول<sup>-1</sup> مط<sup>-1</sup>

## 15.2 اعتماد السعة الحرارية على درجة الحرارة

في الواقع انه من غير الممكن تخمين القيم العددية للسعات الحرارية اعتماداً على الدينامية الحرارية. الا انه في بعض الحالات وبالاعتماد على الميكانيك الاحصائي (Statistical Mechanics) يكون من الممكن حساب السعات الحرارية لبعض المواد من المعلومات الطيفية ونتائج هذه الطريقة تكون جيدة بالنسبة للجزيئات الغازية البسيطة، الا ان الطريقة المباشرة للحصول على السعات الحرارية هي بواسطة



القياسات المسعرة وهي الطريقة المستخدمة لتحديد معظم السعات الحرارية. في الحقيقة ان السعات الحرارية، خصوصاً بالنسبة للجزيئات الغازية المعقدة ( المتعددة الذرات )، تتغير مع درجة الحرارة ولهذا فأن هناك معادلات وضعية (Emperical Equations) لربط السعات الحرارية المقاسة لهذه الغازات على مدى معين من درجات الحرارة، ومن هذه المعادلات الوضعية المعادلة التالية:

$$c_p = a + bT + cT^2 + \dots \quad (2-78)$$

حيث  $a$ ،  $b$ ،  $c$  هي معاملات تكيف بحيث تعطي قيم مطابقة للمعلومات. هذا وان لكل غاز قيم معينة من المعلومات، الجدول (1-2)، تجعل من الممكن حساب ( $C_p$ ) لغاز في اية درجة حرارة. وهناك معادلات وضعية بأشكال أخرى منها المعادلة:

$$c_p = a' + b'T + \frac{c'}{T^2} + \dots \quad (2-79)$$

حيث  $a'$ ،  $b'$ ،  $c'$  هي الأخرى معاملات خاصة لكل غاز.  
( الجدول 1-2 ) المعاملات في المعادلة الوضعية (2-78) للسعات الحرارية لبعض الغازات تحت ضغط ثابت ( $C_p$  بوحدة جول مول<sup>-1</sup> ( درجة مطلقة )<sup>-1</sup> )

المادة ( غاز )	مدى درجة الحرارة °K	a	$10^3 \times b$	$10^7 \times c$
H <sub>2</sub>	1500-273	29.07	0.836-	20.1
O <sub>2</sub>	1500-273	25.72	12.98	38.6-
N <sub>2</sub>	1500-273	27.30	5.23	0.04-
Cl <sub>2</sub>	1500-273	31.70	10.14	2.72-
H <sub>2</sub> O	1500-273	30.36	9.61	11.8
CO <sub>2</sub>	1500-273	26.00	43.5	148.3-
CH <sub>4</sub>	1500-273	14.15	75.5	180-
HCl	1500-273	28.17	1.82	15.5
n.C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1500-273	30.60	438.9	1355-
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1500-273	1.18-	32.6	1100-

ان مدى درجات الحرارة المئين في الجدول (2-1) هو المدى الذي يصح فيه تطبيق المعادلة (78-2) لحساب  $(C_p)$ . بالنسبة الى قيم  $(C_v)$  فإنه من الممكن الحصول عليها من قيم  $(C_p)$  باستخدام المعادلة (77-2).

لحساب  $(\Delta H)$  لمادة من قيم  $(C_p)$  على مدى من درجات الحرارة تستخدم المعادلة (60-2) لهذا الغرض وتجرى عملية تكامل لـ  $(C_p)$  بين الحدين  $T_1$  و  $T_2$  لنحصل على المعادلة.

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \dots(2-80)$$

وبالتعويض عن  $(C_p)$  في احدى المعادلات الوضعية، المعادلة (78-2)، ينتج:

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2 + \dots) dT \quad \dots(2-81)$$

حيث  $H_1$  و  $H_2$  و  $T_1$  و  $T_2$  على التوالي انتالبية ودرجة الحرارة المطلقة للحالتين الابتدائية والنهائية، يمكن كتابة المعادلة (81-2) كما يلي:

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_1}^{T_2} a dT + \int_{T_1}^{T_2} bT dT + \int_{T_1}^{T_2} cT^2 dT \quad \dots(2-82)$$

وبما ان  $a$  و  $b$  و  $c$  مقادير ثابتة فإن تكامل المعادلة (82-2) يعطي:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = a (T_2 - T_1) + \frac{b}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{c}{3} (T_2^3 - T_1^3) \quad \dots(2-83)$$

## مثال (8)

عينة من غاز الهيدروجين كتلتها 20 غم سخنت من درجة حرارة 27 م° الى درجة حرارة 127 م° تحت ضغط ثابت. احسب  $\Delta H$  و  $\Delta V$  لهذه العملية.

## الحل

الطريقة الاولى: — تحسب أولاً ( $C_p$ ) لغاز الهيدروجين في كل درجة حرارة من المعلومات الموجودة في الجدول (1-2) وباستخدام المعادلة (2-78)، ومن معدل ( $C_p$ ) بين درجتَي الحرارة (27) و (127 م°) تحسب ( $\Delta H$ ) باستخدام المعادلة (2-62). تحسب ( $cp$ ) في درجة حرارة (300) مطلقة كالآتي:

$$\begin{aligned}(cp)_{400^\circ K} &= a + bT + cT^2 \\ &= 29.07 + (-0.836 \times 10^{-3})(300) + (20.1 \times 10^{-7})(300)^2 \\ &= 29.0 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^\circ \text{ (جول مول}^{-1}\text{ مط}^{-1}\text{)}\end{aligned}$$

وتحسب في درجة حرارة (400) مطلقة، حيث تكون:

$$\begin{aligned}(cp)_{400^\circ K} &= 29.07 + (-0.836 \times 10^{-3})(400) + (20.1 \times 10^{-7})(400)^2 \\ &= 29.057 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^\circ\end{aligned}$$

$$(cp)_{av.} = \frac{29.0 + 29.057}{2} = 29.029 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^\circ$$

تنبيه: يجب تحويل درجة الحرارة من المتوية الى المطلقة قبل اجراء الحسابات. بما ان قيمة  $(C_p)_{av.}$  هي للمول الواحد من الغاز و ( $\Delta H$ ) المراد حسابها هي لكمية الغاز الذي سخن، لذا فإن المعادلة (2-62) تصبح:

$$\Delta H = n C_p \Delta H$$

حيث  $n$  عدد مولات الغاز. وعليه فإن ( $\Delta H$ ) لعملية تسخين (20) غم من غاز الهيدروجين تساوي الى:

$$\Delta H = \frac{20}{2} \text{ mol} \times 29.029 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{0-1} \times (400 - 300) \text{ K}^{\circ}$$

$$= 29029 \text{ J} = 29.029 \text{ KJ}.$$

وهذا هو مقدار الحرارة اللازمة لعملية تسخين الغاز .

اما الطريقة الثانية ( الطريقة المضبوطة والاكثر دقة ) لحساب  $\Delta H$  :  
 تحسب ( $\Delta H$ ) باستخدام المعادلة (2-80) ، او المعادلة (2-83) ، مباشرة بعد ضرب طرفها الايمن بعدد مولات الغاز المستخدم لتصبح المعادلة كالآتي :

$$\Delta H = n \int_{300}^{400} C_p dT$$

$$\Delta H = \frac{20}{2} \int_{300}^{400} (29.07 - 0.836 \times 10^{-3}T + 20.1 \times 10^{-7}T^2) dT$$

$$\Delta H = 10 (29.07) (400 - 300) - \frac{1}{2} (0.836 \times 10^{-3}) (16 \times 10^4 - 9 \times 10^4) +$$

$$\frac{1}{3} (20.1 \times 10^{-7}) (64 \times 10^6 - 27 \times 10^6)$$

$$= 29052 \text{ J} = 29.025 \text{ kJ}.$$

ويحسب ( $\Delta V$ ) لهذه العملية باستخدام المعادلة (2-58) كما يلي :

$$\Delta V = C_v \Delta T$$

وعليه يستوجب اولاً حساب معدل قيمة  $(C_v)_{av}$  على مدى درجات الحرارة 400-300 مطلقة ، ويتم ذلك من قيمة  $(C_p)_{av}$  المحسوبة اعلاه والمعادلة (2-77) .

$$(C_v)_{av} = (C_p)_{av} - R = 29.029 - 8.31$$

$$= 20.719 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

اذن

$$\Delta V = \frac{20}{2} \times 20.719 \times (400 - 300)$$

$$= 20719 \text{ J} = 20.719 \text{ kJ} .$$

يلاحظ في هذه الحسابات ان  $\Delta H$  تزيد على  $\Delta V$  بمقدار 8310 جول وهذا المقدار يساوي عدد مولات الغاز ( 10 مولات ) مضروبة بـ  $R$  ( 8.31 جول مول<sup>-1</sup> درجة مطلقة<sup>-1</sup> ) ( اي الفرق بين  $C_p$  و  $C_v$  ) مضروباً بالفرق بين درجتي الحرارة ( 100 درجة حرارية ) اي ان :

$$\Delta H - \Delta U = 29029 - 20719 = 8310 \text{ J} = (10 \times 8.31 \times 100) \text{ J}$$

## 16.2 تطبيقات اخرى للقانون الاول للدينامية الحرارية على الغازات المثالية :

تكلمنا، مع الشرح، اعلاه عن بعض تطبيقات القانون الاول للدينامية الحرارية من الغازات المثالية، وسنبين فيما يلي تطبيقات اخرى للقانون الاول على الغازات المثالية .

### تغير حجم او ضغط غاز مثالي بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة :—

تنص المعادلتان (30-2) و (31-2) ان الطاقة الداخلية ( $U$ ) لغاز مثالي لا تتغير بتغير حجم او ضغط الغاز اذا تمت العملية تحت درجة حرارة ثابتة ( عملية ثابتة درجة الحرارة ) ، اي انه لأية عملية ثابتة درجة الحرارة تشمل غاز مثالي تكون :

$$\Delta U = 0 \quad \dots(2-84)$$

كذلك بالنسبة الى الانثالية لغاز مثالي ولكونها دالة لدرجة الحرارة فقط، بسبب ان طاقة الغاز المثالي وحاصل ضرب ضغطه في حجمه ( $Pv$ ) هما دالتان لدرجة الحرارة فقط، فأن :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_T = 0 \quad \dots(2-85)$$

اي انه لأية عملية ثابتة درجة الحرارة فأن :

$$\Delta H = 0 \quad \dots(2-86)$$

تمدد غاز مثالي بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة ( الشغل المنجز يمثل أقصى شغل ( $W_{max}$ ) يمكن ان يقوم به الغاز ) فإن تعويض المعادلة (2-84) في المعادلة (2-25) يعطي :

$$0 = q_{rev} + W_{max} \quad \dots(2-87)$$

او ان

$$q_{rev} = - W_{max} \quad \dots(2-88)$$

حيث  $q_{rev}$  تمثل الحرارة الممتصة في العملية الرجوعية. اي ان ، وفقاً للمعادلة (2-88) ، الشغل المنجز من قبل الغاز ( المنظومة ) يساوي الى الحرارة الممتصة. بما ان عملية تمدد الغاز المثالي هي رجوعية ثابتة درجة الحرارة فإن الشغل المنجز ( $W_{max}$ ) يعطى بالمعادلة (2-16) ، وتصبح المعادلة (2-88) كالآتي :

$$q_{rev.} = n RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots(2-89)$$

او

$$q_{rev.} = 2.303 n RT \log \frac{V_2}{V_1} \quad \dots(2-90)$$

وبدلالة الضغط الابتدائي والنهائي فإن :

$$q_{rev.} = 2.303 n RT \log \frac{p_1}{p_2} \quad \dots(2-91)$$

وبواسطة المعادلتين (2-90) و (2-91) يمكن حساب الحرارة الممتصة لتمدد (n) مول من الغاز المثالي بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة او حساب اي حد اخر بدلالة الحدود الاخرى .

مثال (9)

تمدد 2.8 غرام من غاز النايتروجين بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة الى ان اصبح حجمه 24.6 لترا. فاذا علمت ان الضغط الابتدائي لغاز النايتروجين

يساوي (1) جو ودرجة الحرارة التي اجرى فيها التمدد هي (27) مئوي، وعلى افتراض ان الغاز يسلك السلوك المثالي، احسب كل من  $W$  و  $q$  و  $\Delta U$  و  $\Delta H$ .

الحل

بما ان العملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة، لذا فإن الشغل المنجز يمثل اقصى شغل ويحسب بواسطة المعادلتين (16-2) او (18-2). فلحساب ( $W_{\max}$ ) بواسطة المعادلة (16-2):

$$W_{\max} = -2.303 n RT \log \frac{V_2}{V_1} \quad \dots (2-16)$$

يُحسب الحجم الابتدائي ( $V_1$ ) للغاز اولاً، حيث يمكن الحصول عليه من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية كالآتي:

$$p_1 V_1 = n RT$$

حيث ( $p_1$ ) الضغط الابتدائي ويساوي الى ضغط جوي واحد، وعليه

$$1 \times V_1 = \frac{2.8}{28} \times 0.082 \times (273 + 27)$$

اذن

$$V_1 = 2.46 \text{ liter لتر}$$

وبتعويض القيم المتوفرة للمعادلة (16-2) يحسب  $W_{\max}$ :

$$W_{\max} = -(2.303)(0.1 \text{ mol})(0.082 \text{ 1 atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(300 \text{ }^\circ\text{K})$$

$$\times \log \frac{24.6}{2.46}$$

$$= -5.665 \text{ I atm لتر جو}$$

$$\approx -137.28 \text{ سرعة}$$

$$W_{\max} = -574.137 \text{ J جول}$$

وهو يمثل مقدار الشغل المنجز من قبل الغاز، وتدل الاشارة السالبة على ان الشغل قد انجز من قبل الغاز. بما ان عملية تمدد الغاز تمت تحت درجة حرارة ثابتة لذا فإن.

$$\Delta U = 0$$

وكذلك

$$\Delta H = 0$$

اما الحرارة الممتصة ( $q_{rev.}$ ) فأنها تحسب وفق المعادلة (2-88)، اي ان

$$q_{rev.} = -W_{max} = 574.137 \text{ J.}$$

من الممكن الحصول على نفس القيم لـ ( $W_{max}$ ) و ( $q_{rev.}$ ) بدلالة الضغط الابتدائي والضغط النهائي للغاز واستخدام المعادلة (2-18).

تغير حجم او ضغط غاز مثالي بعملية غير رجوعية ثابتة درجة الحرارة:

بما ان التغير يتم في درجة حرارة ثابتة فأن:

$$\Delta U = \Delta H = 0$$

لذا، بغض النظر عن ان العملية غير رجوعية. ففي حالة تمدد غاز مثالي بعملية غير رجوعية ثابتة درجة الحرارة، فأن المعادلة (2-25) تصبح:

$$q_{irr.} = -W_{irr} \quad \dots(2-92)$$

حيث  $W_{irr.}$  الشغل المنجز بعملية غير رجوعية  $q_{irr}$  الحرارة الممتصة خلال العملية غير الرجوعية. وبتعويض المعادلة (2-22) في المعادلة (2-92) ينتج ان:

$$q_{irr} = n RT \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) \quad \dots(2-93)$$

او

$$q_{irr} = n RT \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \quad \dots(2-94)$$

وعليه ففي المثال (6) فأن الحرار الممتصة تساوي الى

$$q_{irr} = 2243.7 \text{ J (جول)}$$

و

$$\Delta U = \Delta H = 0$$



## 17-2 التمدد الرجوعي الكظيم : (Adiabatic Reversible Expansion)

بما انه في العملية الكظيمة لا يحدث تبادل حراري بين المنظومة ومحيطها،  
لذا فان :

$$dq = 0 \quad \dots(2-95)$$

وبتعويض المعادلة (95-2) في المعادلة (24-2) نحصل على ان :

$$U = 0 + dW = dW \quad \dots(2-96)$$

او ان

$$\Delta U = W \quad \dots(2-97)$$

يظهر من المعادلة (97-2) ان اي شغل منجز في عملية كظيمة يجب ان يتم على حساب الطاقة الداخلية للمنظومة . فعندما تقوم المنظومة بالشغل فان ، تبعاً للمعادلة (97-2) ، الطاقة الداخلية للمنظومة سوف تنخفض ولكون درجة حرارة الغاز المثالي هي دالة لطاقته الداخلية ، لذا تنخفض درجة حرارة الغاز المثالي الذي يعاني تمداً بعملية كظيمة . في حين ترتفع درجة حرارة الغاز المثالي عندما يكون الشغل منجز عليه من قبل المحيط .

يمكن اشتقاق معادلة من المعادلة (97-2) يخضع لها اي غاز مثالي في اية مرحلة من مراحل تمدده بعملية رجوعية كظيمة . فلنفرضنا انه لدينا (n) مول من غاز مثالي ضغطه (p) وحجمه (v) وان حجمه قد تغير تغيراً ضئيلاً (dv) فان الشغل المنجز يساوي .

$$dW = - p dv \quad \dots(2-98)$$

وعليه تصبح المعادلة (96-2) كالآتي :

$$dU = - p dv \quad \dots(2-99)$$

لكن وفق المعادلة (56-2) وله (n) مول من الغاز المثالي فأن :

$$dU = nC_V dT \quad \dots(2-100)$$

وبتعويض المعادلة (100-2) في المعادلة (99-2) ينتج ان :

$$nC_V dT = - p dV = dW \quad \dots(2-101)$$

بما ان العملية رجوعية لذا فأن الضغط الداخلي للغاز يساوي الى الضغط الخارجي المسلط ، وعليه ومن معادلة الحالة العامة للغازات المثالية فأن :

$$p = \frac{nRT}{V}$$

وبذا تصبح المعادلة (101-2) كالآتي :

$$nC_V dT = - n RT \frac{dV}{V} \quad \dots(2-102)$$

او ان

$$-\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} \quad \dots(2-103)$$

وبتكامل طرفي المعادلة (102-3) ، الطرف الايمن بين  $V_1$  و  $V_2$  والطرف الايسر بين  $T_1$  و  $T_2$  وافترض ان  $C_V$  ثابتة ، نحصل على المعادلة :

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \frac{R}{C_V} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \quad \dots(2-104)$$

والتي تعطي

$$-\ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{R}{C_V} \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots(2-105)$$

وبما ان

$$C_P - C_V = R$$

بالنسبة للغاز المثالي ، فعليه تصبح المعادلة (104-2) كما يلي :

$$-\ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{c_p - c_v}{c_v} \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{....(2-106)}$$

او

$$-\ln \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{....(2-107)}$$

وباستخدام التعريف المتفق عليه  $\gamma$  والذي يساوي الى

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

تصبح المعادلة (107-2) كما يلي :

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = (\gamma - 1) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{....(2-108)}$$

او

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1} \quad \text{....(2-109)}$$

وبواسطة المعادلة (109-2) يمكن حساب المعلومات اللازمة لحساب الشغل من المعادلة (98-2) او التغير في الطاقة الداخلية من المعادلة (99-2). فبالنسبة للغاز المثالي فأن

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{....(2-110)}$$

او ان

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} \quad \text{....(2-111)}$$

وبتعويض المعادلة (111-2) في المعادلة (109-2) نحصل على

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1} \quad \text{....(2-112)}$$

وبذا يتكون

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma \quad \dots(2-113)$$

اذن :

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma = c_1 \quad \dots(2-114)$$

حيث  $c_1$  مقدار ثابت. او ان لعملية تمدد غاز مثالي بصورة رجوعية كظيمة فأن

$$P V^\gamma = c_1 \quad \dots\dots\dots(2-115)$$

من المعادلة (2-109) نحصل على ان

$$T_1 (V_1)^{\frac{R}{c_v}} = T_2 (V_2)^{\frac{R}{c_v}} = c_2 \quad \dots(2-116)$$

حيث  $c_2$  مقدار ثابت. يختلف  $c_1$  و  $c_2$  عن بعضهما الاخر عددياً الا انهما يعتمدان على كمية الغاز الموجودة.

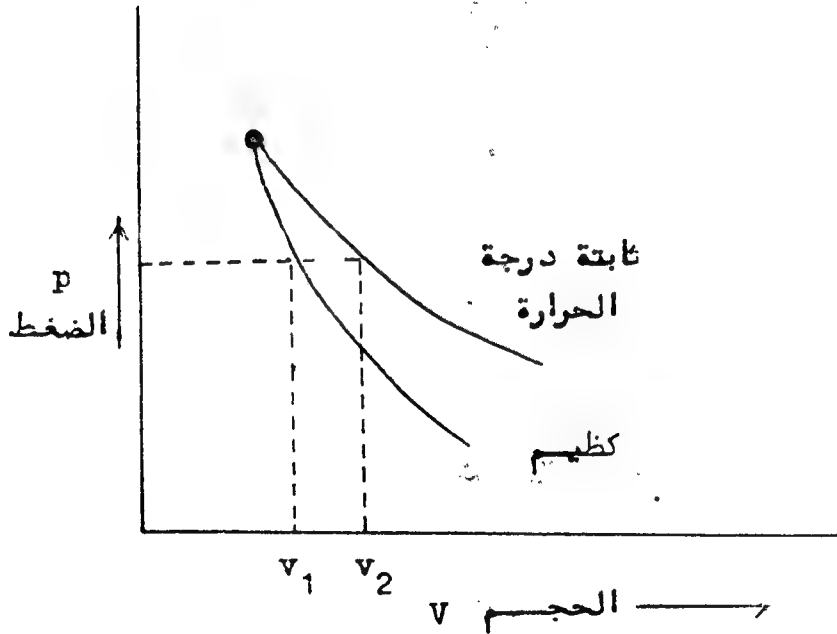
في الحقيقة ان المعادلتين (2-115) و (2-116) لا يمكن ان تحلى محل معادلة الحالة العامة للغازات المثالية ( $PV = nRT$ )، بل انهما متممتان لها. ففي حين ان معادلة الحالة العامة للغازات المثالية تطبق تحت جميع الظروف، نرى ان المعادلتين (2-115) و (2-116) تطبق فقط تحت ظروف رجوعية كظيمة.

تتمد غاز مثالي بعملية ثابتة درجة الحرارة فأن :

$$P V = c \quad \dots(2-117)$$

حيث  $c$  مقدار ثابت. وبرسم المعادلتين (115-2) و (117-2) نحصل على المنحنيين المبيينين في الشكل (6-2). من مقارنة المنحنيين في الشكل (6-2) يلاحظ، ابتداءً من نفس النقطة، ان المنحني الناتج من رسم (p) مقابل (v) لعملية كظيمة هو اشد انحداراً من المنحني الناتج من نظيره لعملية ثابتة درجة الحرارة، لذا ولنفس الانخفاض في الضغط فإن الزيادة الحاصلة في الحجم ( $V_2$ ) لعملية تمدد ثابتة درجة الحرارة تكون اكبر من الزيادة الحاصلة في الحجم  $v_1$  لعملية تمدد كظيم، اي ان  $v_2$  تكون اكبر من  $v_1$ ، ويعزى ذلك الى انخفاض درجة الحرارة في عملية التمدد الكظيم وبما لهذا الانخفاض في درجة الحرارة من تأثير على حجم الغاز.

في الواقع يفاد من ظاهرة انخفاض درجة حرارة منظومة تعاني تمدداً كظيماً في عملية التجميد في حين يفاد من عمليات التقلص الكظيم لمنظومة من العمليات التي يراد منها التسخين.



الشكل (6-2) رسم (p) مقابل (v) لعملية ثابتة درجة الحرارة واخرى كظيم.

الشغل المنجز من عملية تمدد غاز مثالي بصورة رجوعية كظيم :

من الممكن حساب الشغل المنجز خلال عملية تمدد غاز مثالي بصورة رجوعية كظيم وذلك بالافادة من المعادلة (2-101) :

$$W = \int_{T_1}^{T_2} n c_v dT \quad \dots(2-118)$$

حيث  $T_1$  و  $T_2$  تمثلان درجتني الحرارة الابتدائية والنهائية على التوالي . واذا اعتبرنا ان  $c_v$  للغاز المثالي مقدار ثابت ، فان تكامل المعادلة (2-118) يعطي :

$$\dots(2-119)$$

$$W = n c_v (T_2 - T_1)$$

ويمثل (w) في المعادلة (2-119) الشغل المنجز خلال عملية رجوعية كظيم، اي انه يمكن حساب الشغل المنجز في عملية تمدد غاز مثالي بصورة رجوعية كظيم من السعة الحرارية للغاز تحت حجم ثابت ودرجتني الحرارة الابتدائية والنهائية .

من الممكن، كذلك، حساب الشغل المنجز نتيجة تمدد غاز مثالي بعملية رجوعية كظيم من حجم ابتدائي ( $V_1$ ) الى حجم نهائي  $V_2$  بالطريقة التالية . من المعادلة (2-116) فان :

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{R}{c_v}} \quad \dots(2-120)$$

وبتعويض المعادلة (2-120) في المعادلة (2-119) ينتج :

$$W = n c_v T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{R}{c_v}} - 1 \quad \dots(2-120)$$

او

$$W = n c_v T_2 \left( 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{R}{c_v}} \right) \quad \dots(2-121)$$

مثال (10)

تمدد مول واحد من غاز مثالي تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة (300.2) مطلقة بعملية رجوعية كظيم الى ان اصبح حجم الغاز مساو الى (49.2) لتر. فاذا علمت ان السعة الحرارية المولارية تحت حجم ثابت للغاز ( $c_v$ ) تساوي (12.54) جول مول<sup>-1</sup> مط<sup>-1</sup>. احسب  $P_2$ ،  $T_2$ ،  $W$ ،  $\Delta U$  و  $\Delta H$  لهذه العملية.

الحل

يمكن إيجاد الحجم الابتدائي للغاز ( $v_1$ ) من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية ويساوي:

$$v_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = \frac{1 \times 0.082 \times 300}{1} = 24.6 \text{ l}$$

يحصل على ( $P_2$ ) في عملية التمدد الرجوعي الكظيم من المعادلة (2-113) كالآتي:

$$P_2 = P_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\gamma$$

$$\gamma = c_p / c_v$$

$$c_p = R + c_v$$

$$= 8.31 + 12.54 = 20.85 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

وعليه فإن

$$\gamma = \frac{20.85}{12.54} = 1.663$$

ومن قيمة ( $\gamma$ ) فإن الضغط النهائي ( $P_2$ ) يساوي الى

$$P_2 = 1 \times \left( \frac{24.6}{49.2} \right)^{1.663} = 0.316 \text{ atm} \quad (\text{جو})$$

ويحصل على ( $T_2$ ) من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{nR} = \frac{0.316 \times 49.2}{1 \times 0.082} = 189.6^\circ \text{K}$$

أو ان  $T_2$  يمكن ان نحسب من المعادلة (109-2) كما يلي :

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \\ &= 300 \left( \frac{24.6}{49.2} \right)^{1.66-1} \\ &= 189.6^\circ \text{K} \end{aligned}$$

يلاحظ هنا كيف ان درجة حرارة الغاز النهائية انخفضت عن درجة حرارة الغاز الابتدائية نتيجة التمدد الرجوعي. الكظيم. يحسب الشغل المنجز ( $W$ ) وفق المعادلة (119-2) والتي تعطي :

$$\begin{aligned} W &= 1 \text{ mol} \times 12.54 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1} \times (189.6 - 300.2)^\circ \text{K} \\ &= -1386.9 \text{ Joules} \end{aligned}$$

ومن المعادلة (100-2) فإن

$$\begin{aligned} \Delta U &= n c_v (T_2 - T_1) \\ &= -1386.9 \text{ Joules} \end{aligned}$$



اما ( $\Delta H$ ) فتحسب كالآتي : اذا طبقنا المعادلة (2-37) للحالة الابتدائية والحالة النهائية للمنظومة فإن التغير الحاصل نتيجة التحول من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية يصبح :

$$\Delta H = H_2 - H_1 = (U_2 - U_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

. اي ان

$$\Delta H = \Delta U + p_2 v_2 - p_1 v_1$$

ومن معادلة الحالة العامة للغازات المثالية تصبح المعادلة :

$$\Delta H = \Delta U + n R T_2 - n R T_1$$

$$\Delta H = \Delta U + n R \Delta T \quad (a)$$

وبالتعويض عن  $\Delta U$  بدلالة  $c_v$  نحصل على المعادلة

$$\Delta H = n C_v \Delta T + n R \Delta T$$

والتي تعطي المعادلة

....(b)

$$\Delta H = n C_p \Delta T$$

وعليه يمكن حساب  $\Delta H$  اما باستخدام المعادلة (a) او المعادلة (b) فوفقاً للمعادلة (a) فإن :

$$\begin{aligned} \Delta H &= -1386.9 + 1 \times 8.31 \times (189.6 - 300.2) \\ &= -2306 \text{ J} \end{aligned}$$

ووفقاً للمعادلة (b) فإن

$$\begin{aligned} \Delta H &= 1 \times 20.85 \times (189.6 - 300.2) \\ &= -2306 \text{ J} \end{aligned}$$

تمدد غاز مثالي بعملية غير رجوعية كظيم:

في حالة تمدد غاز مثالي بعملية غير رجوعية كظيم مقابل ضغط خارجي ثابت مساو الى ( $p_2$ ) فإن الشغل المنجز يساوي الى

$$W = -P_2(V_2 - V_1) \quad \dots(2-122)$$

حيث  $v_1$  و  $v_2$  الحجم الابتدائي والحجم النهائي للغاز المثالي على التوالي. بما ان العملية كظيم فإن

$$dq = 0$$

وبذا

$$\Delta U = W$$

وبما ان ( $\Delta U$ ) هي دالة حالة اي ان قيمتها تعتمد على الحالة الابتدائية والنهائية للمنظومة بغض النظر عن الاسلوب الذي اجري به التغير رجوعياً كان ام غير رجوعي، لذا فإن:

$$\Delta U = C_V(T_2 - T_1)$$

حيث  $T_1$  و  $T_2$  درجتا الحرارة الابتدائية والنهائية على التوالي، وعليه نحصل على ان:

$$C_V(T_2 - T_1) = -P_2(V_2 - V_1) \quad \dots(2-123)$$

وباستخدام معادلة الحالة العامة للغازات المثالية، يمكن كتابة المعادلة (2-123) كالآتي:

$$W(T_2 - T_1) = -P_2 \left( \frac{RT_2}{P_2} - \frac{RT_1}{P_1} \right) \quad \dots(2-124)$$

او

$$W(T_2 - T_1) = -R \left( T_2 - \frac{T_1 P_2}{P_1} \right) \quad \dots(2-125)$$

حيث  $p_1$  الضغط الابتدائي و  $p_2$  الضغط النهائي والذي يساوي الى الضغط المسلط والمتغيرات الاخرى كما عرض اعلاه، ومن  $(p_1)$  و  $(p_2)$  و  $(c_v)$  يمكن حساب  $(T_2)$  باستخدام احدى المعادلتين (124-1) او (125-1). مما تجدر الاشارة اليه ان المعادلة (114-2) لا يمكن تطبيقها في هذه الحالة لانها تطبق فقط في العملية الرجوعية الكظيم.

#### مثال (11)

لنأخذ المثال (10-2) فاذا فرضنا ان الغاز قد تمدد بعملية غير رجوعية كظيم ضد ضغط خارجي مقداره (0.316) جو الى ان اصبح ضغط الغاز مساو للضغط الخارجي. احسب  $T_2$  و  $W$  و  $\Delta U$  و  $\Delta H$  لهذه العملية.

#### الحل

من المعادلة (125-2) فإن  $T_2$  تساوي الى :

$$12.54 (T_2 - 300.2) = - 8.31 \left( T_2 - \frac{300.2 \times 0.316}{1} \right)$$

$$T_2 = 218.4^\circ \text{ K}$$

يلاحظ ان  $T_2$  في العملية غير الرجوعية الكظيم اكبر من  $T_2$  للعملية الرجوعية الكظيم، اي ان مقدار الانخفاض في درجة حرارة الغاز اقل ( المثال 10-2 ) ومن قيمة  $T_2$  فإن من الممكن حساب  $(W)$  باستخدام المعادلة :

$$W = \Delta U = n c_v (T_2 - T_1)$$

والتي تعطي

$$W = 1 \times 12.54 (218.4 - 300.2)$$

$$W = - 1025.8 \text{ J.}$$

ومقدار الشغل الناتج هو، كذلك، اقل من الشغل المنجز في العملية الرجوعية الكظيم ( مثال 10-2 ).

و  $(\Delta H)$  تحسب من المعادلة

$$\Delta H = n c_p (T_2 - T_1)$$

$$= 1 \times 20.85 (218.4 - 300.2)$$

$$= -1705.5 \text{ J.}$$

## اسئلة الفصل الثاني

1 — احسب الشغل المنجز عند اذابة (110) غرام من الحديد في حامض الهيدروكلوريك في: (أ) اناء مغلق و (ب) اناء مفتوح في ظ.ق. الجواب: (أ)  $W = 0$  صفر، (ب)  $W = 4.42$  كيلو جول.

2 — لتبخير مول واحد من الماء في درجة غليانه وتحت ضغط ثابت مساو الى ضغط جوي واحد يحتاج الى (40.6) كيلو جول من الحرارة. وبسبب زيادة الحجم نتيجة للتبخير تقوم المنظومة بشغل على المحيط: (أ) اذا علمت ان حجم المول الواحد من الماء السائل هو (0.019) لتر في درجة حرارة (373) مطلقة وافترض الماء كغاز مثالي، احسب الشغل المسجل لتبخير مول واحد من الماء السائل. (ب) ماهي قيمتي  $\Delta U$  و  $\Delta H$  لهذه العملية، الجواب: (أ) 3.1 كيلو جول، (ب) 37.5 كيلو جول، (ج) 34.4 كيلو جول.

3 — مقدار 56 غم من غاز النايتروجين سخن تحت ضغط ثابت مقداره ضغط جوي واحد من درجة حرارة (300) مطلقة الى درجة حرارة (500) مطلقة. باستخدام العلاقة  $c_p = a + bT + cT^2$  للسعة الحرارية تحت ضغط ثابت، احسب الحرارة (q)، الشغل (W)،  $\Delta H$  و  $\Delta U$  لهذه العملية.

4 — احسب الحرارة الممتصة خلال عملية تمدد غاز الاوكسجين بعملية ثابتة درجة الحرارة من ضغط جوي واحد الى حجم (100) لتر في درجة حرارة (15) مئوية.

الجواب: (3723 جول)

5 — تمدد غاز مثالي بعملية كظيم فانخفضت درجة حرارته من (300) مطلقة الى (250) مطلقة. فاذا علمت ان السعة الحرارية تحت حجم ثابت لهذا الغاز

هي ( $c_v = 1.5 R$ ). ماهو مقدار الشغل الذي انجزه الغاز خلال عملية التمدد؟ احسب  $\Delta U$  و  $\Delta H$  و  $q$  لهذه العملية.

6 — مول واحد من غاز مثالي في درجة حرارة ابتدائية (300) مطلقة، فاذا تمدد الغاز بعملية رجوعية كظيم من ضغط ابتدائي مقداره (10) جو الى ضغط نهائي مقداره واحد جو. احسب درجة الحرارة النهائية علماً بأن  $R = 3/2$   $c_v =$ .

7 — مامقدار الحرارة اللازمة لرفع حرارة (88) غرام من ثنائي اوكسيد الكربون من درجة حرارة (27) مئوي الى درجة حرارة (627) مئوي تحت ضغط مقداره واحد جو.

8 — سخنت خمسة مولات من غاز مثالي احادي الذرة من درجة حرارة (25) مئوي الى درجة حرارة (75) مئوي. احسب  $w$  و  $q$  و  $\Delta U$  عندما: (أ) تجرى العملية تحت حجم ثابت و (ب) عندما يكون الضغط الخارجي ثابت.

الجواب: (أ)  $w = 0$ ، صفر،  $q = \Delta U = 3138$  جول

(ب)  $w = -2092$  جول،  $q = 5230$  جول،  $\Delta U = 3138$  جول

9 — حفظت 65 غرام من غاز الزينون (Xe) في اناء ضغطه مساو الى ضغطين تجوين. وفي درجة حرارة الغرفة. سمح لهذا الغاز بالتمدد بعملية كظيم: (أ) بعملية رجوعية الى ضغط جوي واحد، (ب) ضد ضغط جوي واحد. فاذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للغاز هي (298) مطلقة، ماهي درجة الحرارة النهائية في كل حالة من الحالتين. الجواب: (أ) 238 مط، (ب) 226 مط.

10 — (أ) سمح لمول واحد من غاز هيدروكربوني مفلور بالتمدد بعملية رجوعية كظيم الى ان اصبح حجمه ضعف حجمه الاصلي. فانخفضت، في عملية التمدد، درجة الحرارة من 298.15 مط الى 248.44 مط. ماهي قيم كل

من  $c_v$  (المولارية  $\Delta U$  و  $\Delta H$  لعملية تمدد الغاز

الجواب  $c_v = 31.6$  جول مط<sup>-1</sup> مول<sup>-1</sup>  $\Delta U = -1.57$  كيلو جول

مول<sup>-1</sup>  $\Delta H = -1.98$  كيلو جول مول<sup>-1</sup>.

(ب) لنفس التجربة في الفرع (أ): اذا علمت ان الضغط الابتدائي كان

1522.2 ملم زئبق، وبعد عملية التمدد أصبح الضغط 613.85 ملم زئبق .  
احسب قيمة كل من ( ) والسعة الحرارية المولارية ( $C_p$ ) للغاز . ( الجواب )  
 $\gamma = 1.31$  ،  $C_p = 41.4$  جول مط<sup>-1</sup> مول<sup>-1</sup> .

11 — تمدد لتران من غاز النيتروجين في درجة صفر مئوي وضغط مقداره خمسة ضغوط جوية بعملية ثابتة درجة الحرارة مقابل ضغط ثابت مقداره واحد جو . الى ان أصبح ضغط الغاز واحد جو ايضاً . افرض ان الغاز مثالي ، احسب قيم كل من  $U$  و  $H$  و  $q$  لهذه العملية .  
( الجواب )  $q = W = 1631.8$  جول ،  $U = H =$  صفر .

12 — ثلاثة مولات من غاز مثالي في درجة حرارة (27) مئوي وضغط مقداره واحد جو . سخنت تحت ضغط ثابت الى ان أصبحت درجة الحرارة النهائية (87) مئوي . اذا علمت ان السعة الحرارية تحت حجم ثابت للغاز هي  $c_v = 7.50 + 3.2 \times 10^{-3} T$  سعة مول<sup>-1</sup> ( درجة حرارة )<sup>-1</sup> .  
احسب  $\Delta U$  ،  $q$  ،  $w$  و  $\Delta H$  للعملية .

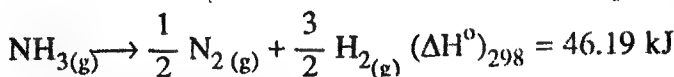
13 — تمددت عشرة غرامات من غاز ثنائي اوكسيد الكربون بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة من حجم (5) لترا الى حجم (10) لترا في درجة حرارة (27) مئوي . افرض السلوك المثالي لغاز ثنائي اوكسيد الكربون ، احسب  $U$  ،  $q$  ،  $w$  و  $H$  للعملية .

14 — استخدام معادلة فاندرفال  $(p + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT$  لمول واحد من غاز واشتق علاقة لعملية تمدد (4) مول من غاز بعملية رجوعية ثابتة درجة الحرارة من حجم ( $v_1$ ) الى ( $v_2$ ) وفي درجة حرارة  $T$  .

15 — اذا علمت ان ثوابت فاندرفال لغاز معين هي  $a = 6.69$  جو — لتر/مول  $b = 0.057$  لتر . احسب اقصى شغل يمكن ان ينجزه الغاز عند تمدد مولين من حجم ابتدائي (4) لترا الى حجم نهائية (40) لتر في درجة حرارة (300) مط .

الجواب :  $W_m = 11.46$  كيلو جول .

16 — للتفاعل التالي :



احسب قيمة  $U$  لهذا التفاعل في درجة حرارة (209) مطلقة .

# الفصل الثالث

## الكيمياء الحرارية Thermochemistry

### (1-3) التغيرات الحرارية في التفاعلات الكيميائية

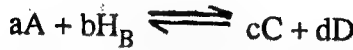
الكيمياء الحرارية، كما يتجلى ذلك من التسمية، هو علم يهتم بالتغيرات الحرارية التي تحدث خلال التفاعلات الكيميائية والتغيرات الفيزيائية. ويعتمد مقدار التغير الحراري ( $dq$ ) الذي يصاحب التفاعل الكيميائي على الطريق الذي يسلكه التفاعل. لذا تجري معظم القياسات الحرارية للتفاعلات اما تحت ضغط ثابت او تحت حجم ثابت، ففي العملية التي تجري تحت ضغط ثابت فان التغير الحراري يساوي ( $q_p$ ) وتلك التي تتم تحت حجم ثابت يساوي الى ( $q_v$ ). في الواقع من المفيد تشخيص حرارة تفاعل كيميائي بدلالة دالة حالة تعتمد على الحالة الابتدائية للمنظومة والحالة النهائية لها (المواد المتفاعلة والنتائج لتفاعل على التوالي) وليس على الطريق الذي تسلكه المواد المتفاعلة للتحويل الى نتائج. فلتفاعل كيميائي يجري في اناء معين، وعلى اعتبار ان الاناء ومحتوياته يمثلون المنظومة وما دونهم هو المحيط، فان الحرارة التي تدخل الاناء (امتصاص) او تخرج منه لتفاعل تحت حجم ثابت تساوي التغير في الطاقة الداخلية (طاقة التفاعل) ( $\Delta U$ ) للمنظومة، اي ان لتفاعل كيميائي تحت حجم ثابت فان:

$$\Delta U = q_v \quad \dots\dots\dots(3-1)$$

اما في حالة تفاعل كيميائي تحت ضغط ثابت، والشغل المنجز من نوع ( $pV$ )، فقط، فان التغير الحراري (امتصاص او انبعاث طاقة حرارية) ( $q_p$ ) الذي يصاحب التفاعل الكيميائي يساوي الى التغير في انثالية التفاعل تحت ضغط ثابت ( $\Delta H$ ) اي ان:

$$\Delta H = q_p \quad \dots\dots\dots(3-2)$$

يمكن من المعادلتين (1-3) و (2-3) ملاحظة العلاقة التي تربط بين الكيمياء الحرارية وقانون الدينامية الحرارية الأول . فما ان الانثالية هي دالة حالة ، اي ان قيمتها تعتمد على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للمنظومة . لذا فان انثالية التفاعل الكيميائي ستساوي الى الفرق بين انثالية المواد الناتجة وانثالية المواد المتفاعلة ، شريطة ان تكون جميع المواد الناتجة والمتفاعلة تحت نفس الظروف من درجة الحرارة والضغط .  
فللتفاعل الافتراضي التالي :



حيث (a) و (b) و (c) و (d) هي على التوالي عدد مولات المواد المتفاعلة والنتاجات (A) و (B) و (C) و (D) في المعادلة المتعادلة ، فان انثالية التفاعل تحت ضغط ثابت ( $\Delta H$ ) تساوي الى :

$$\Delta H = (cH_C + dH_D) - (aH_A + bH_B) \quad \dots\dots\dots(3-3)$$

حيث ( $H_C$ ) و ( $H_D$ ) انثالية الناتجين (C) و (D) على التوالي و ( $H_A$ ) و ( $H_B$ ) انثالية المادتين المتفاعلتين (A) و (B) على التوالي . بصورة عامة ان انثالية تفاعل كيميائي تساوي الى

$$\Delta H = \sum H_p - \sum H_R \quad \dots\dots\dots(3-4)$$

معادلة

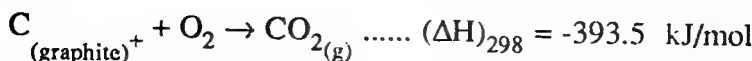
حيث ( $\sum H_p$ ) يمثل لمجموع الجبري لانثاليات نتاجات التفاعل و ( $\sum H_R$ ) يمثل المجموع الجبري لانثاليات المواد المتفاعلة .

ان قياس انثالية تفاعل كيميائي ( $\Delta H$ ) فوائد كثيرة منها استخدامها مع دوال دينمية حرارية اخرى ، لتقدير مدى امكانية حدوث تفاعل كيميائي او لمعرفة مقدار اعتمادية ثابت التوازن (K) لتفاعل على درجة الحرارة او لتحسين (K)

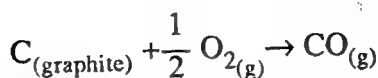


نفسه. عموماً فإن التفاعلات الكيميائية اما ان تكون ماصة للحرارة وتعرف بالتفاعلات الماصة للحرارة (Endothermic) او ان تكون باعثة الحرارة للحرارة ويطلق عليها بالتفاعلات الباعثة للحرارة (Exothermic). ففي حالة التفاعل الماص للحرارة. وفقاً للمعادلة (3-4) وتحت نفس الظروف، فإن انثالية المواد الناتجة تكون اكبر من انثالية المواد المتفاعلة لذا فان قيمة  $(\Delta H)$  لمثل هذا التفاعل تكون موجبة، اما في حالة التفاعل الباعث للحرارة فان انثالية النواتج تكون اصغر من انثالية المواد المتفاعلة وعليه فان قيمة  $(\Delta H)$  تكون سالبة لمثل هذا التفاعل.

بناءً على ما تقدم فانه اصبح من الممكن تعيين  $(\Delta H)$  و  $(\Delta U)$  لتفاعل ما وذلك من قياس قيمة  $(q_p)$  او  $(q_v)$  بصورة مباشرة باستخدام المساعر (Calorimeters) الخاصة، او بصورة غير مباشرة وذلك بتوظيف قيم لانثالية مواد معينة مسبقاً، في تعيين انثالية تفاعل كيميائي معين. مثلاً من الممكن تعيين انثالية احتراق الكربون (الكرافيت) بصورة مباشرة باجراء التفاعل في مسعر خاص وقياس مقدار التغير الحراري الذي يصاحب عملية الاحتراق التام للكربون وتكون غاز ثاني اوكسيد الكربون كما في المعادلة التالية :



الا ان هناك العديد من التفاعلات الكيميائية والتغيرات الفيزيائية التي يصعب او لا يمكن قياس التغير الحراري، الذي يصاحبها، مسعرياً وبصورة مباشرة، وكمثال على ذلك التفاعل التالي :



حيث انه من غير الممكن منع تكون غاز ثاني اوكسيد الكربون ( $CO_2$ ) خلال التفاعل ولذلك لا تمثل حرارة التفاعل المقاسة حرارة اكسدة الكربون الى غاز اول اوكسيد الكربون. ومن الامثلة الاخرى هو تحول الكربون من صورته البلورية المعروفة بألماس الى الكرافيت، الصورة الاخرى للكربون، حيث ان هذا التحول يستغرق زمناً طويلاً مما يصعب قياس حرارته تحريياً باستخدام المساعر، الا انه من الممكن تعيين  $(\Delta H)$  لمثل هذه التفاعلات، وكما ذكرنا، بصورة غير مباشرة من انثالية تفاعلات اخرى كما سنرى ذلك فيما بعد.

ان القياسات الحرارية التي تجرى عادة على تفاعل كيميائي تحت حجم ثابت تتم باستخدام مسعر الاحتراق (Bomb Calorimeter) وان القيمة المقاسة تكون ( $q_v$ ) والتي تساوي ( $U$ ) تحت نفس ظروف التفاعل . ومن قيمة ( $u$ ) يمكن تعيين قيمة ( $H$ ) للتفاعل باستخدام المعادلة التالية :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \quad \dots\dots\dots(3-5)$$

حيث ان

$$\Delta(PV) = \sum (PV)_p - \sum (PV)_R \quad \dots\dots\dots(3-6)$$

حيث  $[(pv)_p]$  و  $[(pv)_R]$  هما للمواد الناتجة والمتفاعلة على التوالي . في حالة التفاعل الذي يشمل مواداً صلبة او سائلة فقط فان التغير في الحجم نتيجة التفاعل يمكن اهماله لصغره ، لذلك يمكن اعتبار المقدار  $[(pv)]$  في المعادلة (3-5) مساوياً الى صفر لنحصل على :

$$\Delta H \approx \Delta U \quad \dots\dots\dots(3-7)$$

اما بالنسبة للتفاعلات التي تكون فيها المواد المتفاعلة والنتائج في الحالة الغازية فان الوضع يكون مختلف اذ تصبح للمقدار  $[\Delta(PV)]$  قيمة معينة تعتمد على مقدار التغير الحاصل في عدد مولات الغازات نتيجة للتفاعل . لذا فان ( $\Delta H$ ) ، لمثل هذه التفاعلات ، سيكون مختلفاً عن ( $\Delta U$ ) ولا يساويه وان مقدار الاختلاف ، او الفرق ، بينها يعتمد على الشغل المنجز ( شغل من نوع  $pv$ ) خلال التفاعل . فإذا افرضنا السلوك المثالي على كل الغازات التي تتضمنها التفاعل معادلة الحالة العامة للغازات المثالية على كل غاز تصبح المعادلة (3-6) حيثئذ كالتالي :

$$\Delta(PV) = \sum (nRT)_p - (nRT)_R \quad \dots\dots\dots(3-8)$$

فاذا اجرى التفاعل في درجة حرارة ثابتة ، اي جعل (T) ثابتة لجميع الغازات ، فان المعادلة (8-3) يمكن كتابتها كالآتي:

$$\Delta(PV) = RT(\sum n_p - \sum n_R) = \Delta n RT \quad \dots\dots\dots(3-9)$$

حيث  $n_R$  و  $n_p$  يمثلان مجموع عدد مولات التناجات الغازية ومجموع عدد مولات الغازات المتفاعلة على التوالي ، و  $(\Delta n)$  يمثل التغير الحاصل في عدد مولات المواد الغازية في المعادلة الكيميائية المتعادلة ويساوي الى :

$$\Delta n = \sum n_p - \sum n_R \quad \dots\dots\dots(3-10)$$

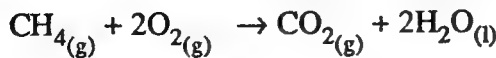
وبتعويض المعادلة (9-3) في المعادلة (5-3) ينتج :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n RT \quad \dots\dots\dots(3-11)$$

وبذا اصبح من الممكن استخدام المعادلة (11-3) وحساب  $(\Delta H)$  أو  $(\Delta U)$  لتفاعل بدلالة الآخر وذلك من قياسات  $(q_p)$  او  $(q_v)$  وحساب  $(n)$  من معادلة التفاعل الكيميائي .

مثال (1) :

احرق مول واحد من غاز الميثان ( $CH_4$ ) بواسطة غاز الاوكسجين تحت حجم ثابت ودرجة حرارة (25)م° وفق المعادلة التالية :



فاذا علمت ان  $(\Delta U)$  للتفاعل تساوي (-884550.7) جول ، احسب  $(\Delta H)$  للتفاعل اعلاه في درجة 25 م° مفترضاً ان  $(\Delta H)$  لا تعتمد على التغير في الضغط .

الحل :

بما ان قيمة ( $\Delta U$ ) معطاة في السؤال ، لذا فان عملية إيجاد قيمة ( $H$ ) تصبح بسيطة جداً ويمكن حسابها باستخدام المعادلة (3-11) بعد استخراج قيمة ( $\Delta n$ ) من المعادلة الكيميائية المتعادلة وتعويضها مع قيمة ( $\Delta U$ ) و ( $R$ ) و ( $T$ ) في المعادلة (3-11). لحساب قيمة ( $\Delta n$ ) لتفاعل اعلاه تعين أولاً المواد الغازية ثم عدد مولات كل منها كما وردت في المعادلة الكيميائية المتعادلة. ففي التفاعل الكيميائي اعلاه فإن المواد الغازية هي فقط ( $CH_4$ ) و ( $O_2$ ) و ( $CO_2$ ) ولا يدخل الماء المتكون في الحساب لانه في الحالة السائلة، وعليه فان ( $\Delta n$ ) تساوي وفقاً للمعادلة (3-10) الى :

$$\Delta n = n_{CH_4} + n_{O_2} - n_{CO_2}$$
$$= 1 + 2 - 1 = -2$$

وعليه فان قيمة ( $\Delta H$ ) تساوي الى

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n RT$$
$$= -884510.7 \text{ J} + (-2 \text{ mole})(8.31 \text{ J/mol K})(298 \text{ K})$$

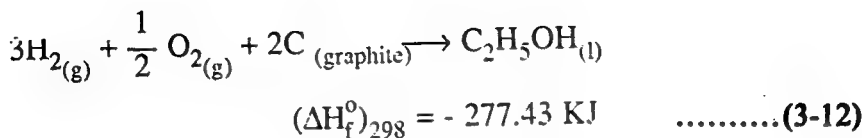
اذن

$$\Delta H = - 889503.5 \text{ J} = 889.5 \text{ KJ.}$$

وقيمة ( $\Delta H$ ) المحسوبة في هذا المثال تمثل مقدار الحرارة المبعثة لاحتراق مول واحد من غاز الميثان او لتكون مول واحد من غاز ثاني اوكسيد الكربون .

### (2-3) المعادلات الكيميائية الحرارية وبعض التعاريف والمصطلحات (Conventions)

بالنظر لكون ان التغير الحراري الذي يصاحب التفاعل الكيميائي لا يعتمد على الطريقة التي اجري بها التفاعل ، اكانت تحت ضغط ثابت ام تحت حجم ثابت ؟ بل يعتمد على كمية المادة المتفاعلة وحالتها الفيزيائية ودرجة الحرارة والضغط والتخفيف وغير ذلك ، لذا فمن الضروري في بادىء الامر توضيح بعض النقاط والامور المهمة التي يستوجب الاطلاع عليها ومعرفتها قبل التعمق في موضوع الكيمياء الحرارية . لنأخذ على سبيل المثال التفاعلات التالية :



كناذج للتفاعلات الكيميائية الحرارية آخذين بنظر الاعتبار المواصفات المتوفرة فيها واتخاذها كشرط، اضافة الى شروط اخرى يجب توفرها في جميع المعادلات الكيميائية الحرارية قبل البدء باية حسابات كيميائية حرارية، وهذه الشروط هي :

- 1 — ان تكون المعادلة الكيميائية متوازنة ( لاحظ المعادلة (12-3) ).
- 2 — كل مادة مذكورة في المعادلة الكيميائية المتوازنة يجب ان تبين الحالة التي هي عليها تحت ظروف التفاعل، كان تكون غازية، سائلة او صلبة، لذا يعلم كل عنصر او مركب في المعادلة الكيميائية باحد الحروف (g) او (l) او (s) يكتب على الجهة اليمنى لذلك العنصر او المركب للدلالة على ان العنصر او المركب هو في الحالة الغازية، السائلة او الصلبة على التوالي. ويمكن ملاحظة ذلك في المعادلة (12-3)، حيث ان (H<sub>2</sub>) و (O<sub>2</sub>) هما في الحالة الغازية والكاربون هو في الحالة الصلبة ( الكرافيت ) والكحول الايثيلي في الحالة السائلة. ان سبب هذا التأثير هو لكون ان (ΔH) التفاعل تعتمد على حالات المواد التي يتضمنها التفاعل، فمثلاً لو ان الكحول الايثيلي، في المعادلة (13-3)، كان بالحالة الغازية لاختلفت قيمة (ΔH) التفاعل عن تلك المعطاة في المعادلة (12-3).
- 3 — عندما يمكن ان تتواجد المواد الصلبة التي يتضمنها التفاعل الكيميائي على اكثر من صورة بلورية واحدة، فمن الضروري تبيان الصورة البلورية التي تتواجد عليها المادة الصلبة، فمثلاً الكاربون هو في الحالة الصلبة وعلى صورة الكرافيت في المعادلة (12-3)، في حين ان الكاربون في المعادلة (14-3) على صورة الكرافيت كإداة متفاعلة وصورة الماسي كنتاج التغيير.

4 — في حالة المواد الغازية التي يتضمنها التفاعل فمن الضروري تبيان ضغوطها، ولو ان  $(\Delta H)$  التفاعل لاتعتمد على تغير الضغط بالنسبة للغازات المثالية. عندما لا يشار الى ضغوط الغازات في المعادلة الكيميائية فانها تؤخذ على اعتبار انها مساوية الى ضغط جوي واحد لكل غاز.

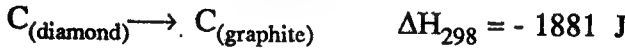
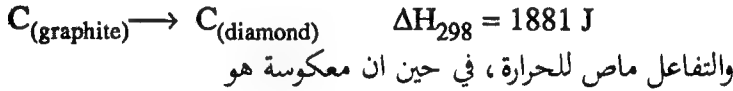
5 — في حالة التفاعلات التي تجري في المحلول المائي فمن الضروري ذكر تراكيز المواد المتفاعلة والمواد الناتجة، والعادة استخدام الرمز  $(aq)$ . ( مأخوذ من الكلمة  $aqueous$  ) بعد احد المواد التي يتضمنها التفاعل للدلالة على ان المحلول على درجة من التخفيف بحيث ان اية اضافة من الماء لاتؤثر على حرارة التفاعل كما يشاهد ذلك في المعادلة (3-13).

6 — تكتب  $(\Delta H)$  ، او  $(\Delta U)$  ، وقيمتها العددية والاشارة، بعد التفاعل كما يلاحظ ذلك في التفاعل (3-12) والتفاعلات التي تليه. بما ان كمية التغير الحراري تتناسب مع كمية المادة المتفاعلة او الناتجة، لذا فان  $(\Delta H)$  المعطاة هي لعدد مولات المواد المتفاعلة او الناتجة. فمثلاً في التفاعل (3-14) فان  $(\Delta H)$  المعطاة هي التحول مول ذرة ( 12 غم ) من الكرافيت ( الكربون ) او لتكون مول ذرة من الماس ( الكربون ) ولتحول مولين ( 24 غم ) من الكرافيت او تكون مولين ( 24 غم ) من الماس فان  $(\Delta H)$  تصبح (  $2 \times 1881 = 3762$  جول ) ، وكذا بالنسبة للتفاعل (3-12) فان  $(\Delta H)$  المعطاة هي لتكون مول واحد ( 46 غم ) من الكحول الايثيلي السائل. ان من الامور التي يجب تبيانها كذلك في المعادلة الكيميائية الحرارية هو درجة حرارة التفاعل، وتكتب عادة درجة حرارة التفاعل بصحبة  $(\Delta H)$  التفاعل كما مبينة في التفاعلات (3-12)-(3-14)، حيث ان جميعها في درجة حرارة (298) مطلقة. كما بينا ذلك سابقاً فان الاشارة السالبة التي تسبق قيمة  $(\Delta H)$  تعني ان التفاعل باعث للحرارة كالتفاعل في المعادلة (3-12) والاشارة الموجبة التي تسبق قيمة  $(\Delta H)$  تعني ان التفاعل ماص للحرارة كما الحال في التفاعل المبين في المعادلة (3-14). بما ان انثالية اي تفاعل كيميائي او تغير فيزيائي تعطي بالمعادلة (3-4)، لذا فمعكوس اي تفاعل تكون انثاليته مساوية في المقدار للتفاعل

الاصلي ومعاكسة له في الاشارة، اي ان معكوس اي تفاعل ماص للحرارة يكون تفاعلاً باعثاً للحرارة واي تفاعل للحرارة يكون تفاعلاً ماصاً للحرارة، اي ان :

$$(\Delta H) \text{ للتفاعل المباشر } = - (\Delta H) \text{ لمعكوس التفاعل } ($$

ويمكن توضيح ذلك بالرجوع الى التفاعل في المعادلة (3-14)، حيث ان التفاعل المباشر هو :



حيث اصبح باعث الحرارة، لاحظ تساوي قيمتي  $(\Delta H)$  في التفاعلين واختلاف اشارتهما.

### 3-3 الحالات القياس (Standard States)

ان اية مادة في اية درجة حرارة تكون في الحالة القياس اذا كانت فعاليتها (activity) تساوي الى واحد. والفعالية هي تصحيح دينمية حرارية للضغط والتركيز، ودرجة الحرارة القياس المتفق عليها هي درجة حرارة (25) مغوي. والحالات القياس المتفق عليها بالنسبة للمواد الصلبة، السائلة، الغازية والمذابة هي :

(أ) الحالة القياس للمادة الصلبة يمثل الشكل الاكثر استقراراً تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة معينة مثل (25°م)، فمثلاً الحالة القياس للكربون تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة 25°م هو الكرافايت.

(ب) الحالة القياس للمادة السائلة وهو الشكل الاكثر استقراراً عندما تكون المادة تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة (25°م)، فالحالة القياس للزئبق هي الحالة السائلة

وللكحول الايثيلي والماء هي الحالة السائلة كذلك .  
(ج) الحالة القياس للمادة الغازية هو الشكل الاكثر استقراراً  
للمادة تحت ضغط جوي واحد ودرجة حرارة معينة مثل (25)  
مئوي ، فالحالة القياس بالنسبة للهيدروجين هي الحالة الغازية  
وكذلك بالنسبة للاوكسجين .

(د) الحالة القياس للمادة المذابة هو التركيز في اية لحظة عندما تكون  
الفعالية تساوي الى واحد .

وعندما تكون المواد التي يتضمنها التفاعل الكيميائي في الحالة القياس فان  
حرارة التفاعل تعرف بأنثالية القياس للتفاعل (Standard Enthalpy of Reaction)  
وتكتب  $(\Delta H^\circ)$  اي بوضع دائرة صغيرة في اعلى الجهة اليمنى من الرمز  
(H°) للدلالة على الحالة القياس . وعليه فان  $(\Delta H^\circ)$  التفاعل في المعادلة (12-3)  
هي انثالية قياس .

### 4-3 انثالية التكوين القياس $(\Delta H_f^\circ)$

#### Standard Enthalpy of Formation

لنرجع الى المعادلة (12-3) ووفقاً للمعادلة (4-3) فان انثالية التفاعل  
 $(\Delta H^\circ)$  تساوي : (3-15)

$$\Delta H^\circ = H^\circ (C_2H_5OH)_l - 3 \times H^\circ (H_2)_g - \frac{1}{2} \times H^\circ (O_2)_g - 2 \times H^\circ (C)_{graph}$$

قبل كل شيء يجب توضيح مايلي :

(أ) ان من غير الممكن تعيين القيم المطلقة للانثالية (H)، بينما يمكن تعيين  
التغير الحاصل في الانثالية  $(\Delta H)$  فقط .

(ب) اعتبار انثالية تكوين اي عنصر في حالته القياس مساوية الى صفر وفقاً  
الى اتفاق عالمي .

وبناءً على ما تقدم ولكون الهيدروجين والاكسجين والكربون في المعادلة  
(12-3) هم في الحالة القياس فان المعادلة (15-3) تصبح :



$$\Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} (C_2H_5OH)_l - 3 \times O - \frac{1}{2} \times O - 2 \times O$$

اي ان

$$\Delta H_{298}^{\circ} = - 277.37 \text{ KJ} = \Delta H_{298}^{\circ} (C_2H_5OH)_l \dots\dots\dots(3-16)$$

بما ان الهيدروجين والاكسجين والكربون هي العناصر المكونة للكحول الايثيلي ( المعادلة 12-3 ) لذا فان اثنائية التفاعل تصبح مساوية لاثنائية تكوين الكحول الايثيلي وتكتب  $(\Delta H_f^{\circ})$  ، حيث الرمز (f) للدلالة على التكوين (formation) ، وبذا تصبح المعادلة (16-3) كالآتي :

$$\Delta H_{298}^{\circ} = (\Delta H_f^{\circ})_{298} (C_2H_5OH)_l = -277.37 \text{ KJ}$$

حيث  $(\Delta H_f^{\circ})$  تقرأ اثنائية التكوين القياس .

وعليه فان اثنائية التكوين القياس لاي مادة تعرف بانها التغير الحراري الذي يصاحب تكوين مول واحد من المادة من عناصره المكونة في الحالة القياس . لذا فان اثنائية التكوين القياس  $\Delta H_f^{\circ} = - 277.37$  كيلو جول ) في المعادلة (12-3) هي لتكوين مول واحد من الكحول الايثيلي ، ولتكوين مولين فان التغير في الاثنائية يساوي  $(-277.37 \times 2 = -554.74)$  كيلو جول ) وهكذا . في الجدول (1-3) اثنائية التكوين القياس لعدد من المواد ، وبما انه من غير الممكن تعيين اثنائية التكوين لجميع المواد بصورة مباشرة ، لذا يلجأ الى طريقة غير مباشرة للحصول على اثنائية التكوين لمثل هذه المواد معتمدين على قانون هيس (Hess law) .

من الممكن استخدام اثنائية التكوين لحساب اثنائية بعض التفاعلات الكيميائية كما في المثال الآتي :

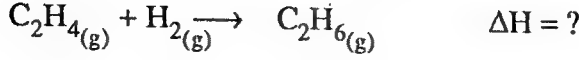
## مثال 2

من المعلومات المتوفرة في الجدول (1-3) احسب حرارة هدرجة الاثيلين الى الايثان في درجة 25 م° وضغط واحد جو .

الجدول (1-3) : انثالبية التكوين القياس ( $\Delta H_f^\circ$ ) لبعض المواد

$\Delta H_f^\circ$ (كيلو جول /مول)	المادة	$\Delta H_f^\circ$ (كيلو جول /مول)	المادة
90.25	NO(g)	0.00	H <sub>2</sub> (g)
33.18	NO <sub>2</sub> (g)	217.95	H(g)
174.10-	HNO <sub>3</sub> (l)	0.00	D <sub>2</sub> (g)
74.68-	CH <sub>4</sub> (g)	221.67	D(g)
84.68-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	0.00	O <sub>2</sub> (g)
103.85	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	247-27	O(g)
146-44-	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	0.00	N <sub>2</sub> (g)
154.47-	iso-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	470.7	N(g)
52.3	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	0.00	C(graphite)
226.73	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	1.9	C(diamond)
82.01-	CH <sub>3</sub> Cl(g)	718.39	C(g)
87.86-	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (g)	0.00	Cl <sub>2</sub> (g)
117.15	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (l)	121.37	Cl(g)
100.42	CHCl <sub>3</sub> (g)	30.71	Br <sub>2</sub> (g)
131.80-	CHCl <sub>3</sub> (l)	0.00	Br <sub>2</sub> (l)
106.70-	CCl <sub>4</sub> (g)	111.71	Br(g)
139.33-	CCl <sub>4</sub> (l)	62.26	I <sub>2</sub> (g)
201.17-	CH <sub>3</sub> OH(g)	0.00	I <sub>2</sub> (g)
201.17-	CH <sub>3</sub> OH(g)	0.00	I <sub>2</sub> (s)
238.57-	CH <sub>3</sub> OH(l)	241.79-	H <sub>2</sub> O(g)
235.31-	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH(g)	285.85-	H <sub>2</sub> O(l)
277.65-	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH(l)	92.30-	HCl(g)
487.02-	CH <sub>3</sub> COOH(l)	36.23-	HBr(g)
378.57-	HCOOH(g)	25.94	HI(g)
424.72-	HCOOH(l)	36.19-	NH <sub>3</sub> (g)
49.04 +	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	393.51-	CO <sub>2</sub> (g)
82.93+	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	110.50-	CO(g)
		0.00	S(rhombic)
		0.34	S(monoclinic)
		102.30	S <sub>8</sub> (g)
		296.83-	SO <sub>2</sub> (g)
		395.72-	SO <sub>3</sub> (g)
		20.63-	H <sub>2</sub> S(g)
		813.99-	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)

الحل :  
اولاً تكتب المعادلة الكيميائية المتوازنة للتفاعل :



المطلوب هو حساب  $\Delta H$  للتفاعل اعلاه من المعلومات المتوفرة في الجدول (1-3). ان انثالبية التفاعل ( $\Delta H$ ) اعلاه تساوي :

$$\Delta H^\circ = (\Delta H_f^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_{6(g)}} - (\Delta H_f^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_{4(g)}} - (\Delta H_f^\circ)_{\text{H}_{2(g)}}$$

حيث ان الانثالبية هي انثالبية التكوين القياس المواد بسبب انها في ظروف الحالة القياس. الان نستخرج من الجدول (1-3) قيم كل انثالبية التكوين القياس لنحصل على :

اذن

$$\Delta H = - 84.68 - 52.3 - 0$$

$$\Delta H = - 136.98 \text{ KJ / mol.}$$

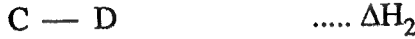
### 5-3 قانون هيس للجمع الحراري الثابت (Hess's law of Constant Heat Summation)

سبق وان ذكرنا ان ( $\Delta H$ ) و ( $\Delta U$ ) هما دالتا حالة اي ان قيمتهما تعتمدان فقط على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للمنظومة التي تعاني تغيراً معيناً. لذلك فان قيمة  $\Delta H$  لتحول مادة متفاعلة الى نتاج تفاعل ستكون ثابتة لا تتغير مهما اختلفت التفاعلات ( الطرق ) التي يمكن من خلالها ان تتحول هذه المادة المتفاعلة الى نتاج التفاعل النهائي المطلوب ، وعلى ذلك وضع هيس قانونه الذي ينص على ان التغير الحراري لأي تفاعل يكون دوماً مقداراً ثابتاً لا يعتمد على الطريقة التي تم بها اجراء التفاعل . معنى ذلك انه من الممكن حساب انثالبيات تفاعلات عديدة بصورة غير مباشرة ، حيث يعتذر او يصعب تعيين انثالبيات قسم منها بالطرق المباشرة ( المساعر ) وذلك بالافادة من تفاعلات اخرى اما ان تكون انثالبياتها معلومة او بالامكان تعيينها بالطرق المباشرة وعمليات جبرية بسيطة يحصل على المعلومات

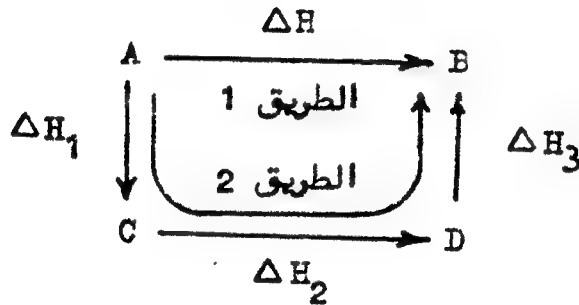
المطلوبة. فلنأخذ التفاعل الافتراضي لتحويل المادة المتفاعلة (A) الى نتاج التفاعل (B)، حيث لا يمكن تعيين ( $\Delta H$ ) بصورة



مباشرة الا انه من الممكن تعيين او معرفة انثالية كل من التفاعلات التالية :



التي تستخدم كخطوط وسيطة للتفاعل الكلي (A-B). يمكن توضيح هذا التفاعل الافتراضي، حيث (A) تمثل الحالة الابتدائية و (B) الحالة النهائية برسم المخطط المبين في الشكل (1-3) :



الشكل (1-3)

يبين الشكل (1-3) طريقين، الطريق (1) وهو مباشر اي بخطوة واحدة، وانتالية ( $\Delta H$ ) والطريق (2) وهو غير مباشر يشمل على ثلاث خطوات متتالية انتالياتها على التوالي  $\Delta H_1$ ،  $\Delta H_2$ ،  $\Delta H_3$ ، حيث يمكن معرفتها بالطرق المباشرة. الان وفقاً لقانون هيس الذي مفاده ان التغير في الانتالية لاي طريق من الطرق

المختلفة لتحول (A) الى (B) يجب ان يكون مقداراً ثابتاً ومتساوياً فيما بينها، معنى ذلك ان التغير في الانثالية وفق الطريق (1) يجب ان يساوي التغير في الانثالية وفق الطريق (2) اي ان :

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad (3-17)$$

او ان

$$(H_B - H_A) = (H_C - H_A) + (H_D - H_C) + (H_B - H_D) \quad \dots\dots\dots(3-18)$$

ومنها نحصل على

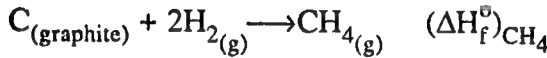
$$(H_B - H_A) = (H_B - H_A)$$

اي انه في قيم  $(\Delta H_1)$  و  $(\Delta H_2)$  و  $(\Delta H_3)$  يمكن حساب قيمة  $(\Delta H)$  .  
لنوضح ذلك بالمثال التالي :

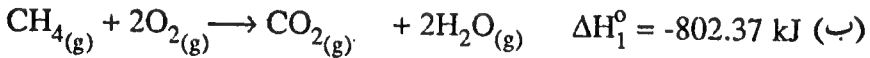
مثال 3

احسب انثالية التفاعل التالي :

( أ )



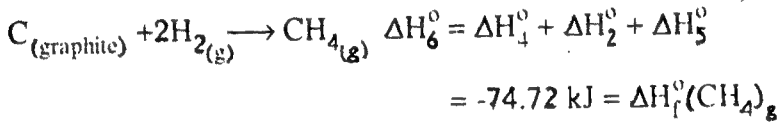
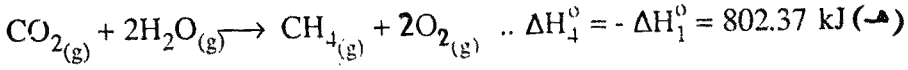
التي تمثل انثالية تكوين غاز الميثان القياسية (Standard Enthalpy of formation) من انثاليات التفاعلات التالية :



الحل :

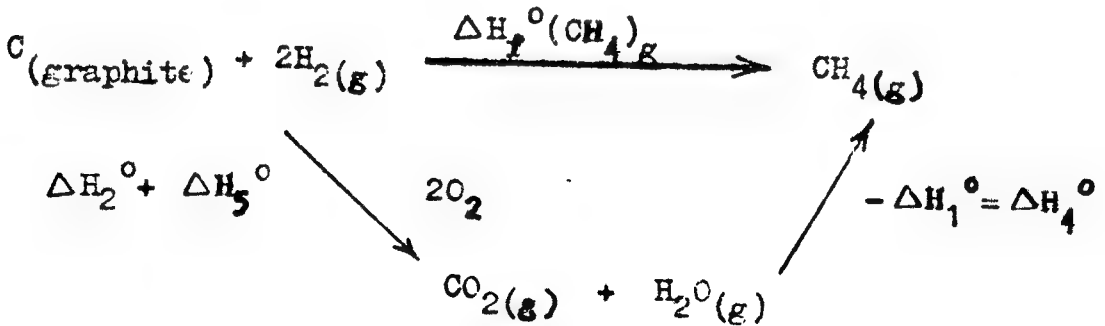
لحساب  $(\Delta H_f^\circ)$  لتفاعل ( أ ) من المعلومات المتوفرة في التفاعلات ( ب ) و ( ج ) و ( د ) يجب أولاً عكس اتجاه التفاعل ( ب ) مع تغيير اشارة  $(\Delta H_1)$  ، لان الميثان في التفاعل ( أ ) هو كنتاج للتفاعل في حين انه مادة متفاعلة

في التفاعل ( ب ) وبذا نحصل على المعادلة ( هـ ) . ثانياً، بما ان عدد مولات الهيدروجين في المعادلة ( أ ) مولين، لذا تضرب المعادلة ( د ) بالمقدار (2)، بما في ذلك قيمة  $\Delta H_3^\circ$ ، فنتج المعادلة ( ج ) . ثالثاً، تجمع المعادلات ( هـ ) و ( ج ) و ( و ) جمعاً جبرياً كما يلي :



لتعطي المعادلة ( أ ) . يلاحظ هنا ان  $\Delta H_f^\circ$  هي حاصل الجمع لـ  $(\Delta H_4^\circ + \Delta H_2^\circ + \Delta H_5^\circ)$

ويمكن توضيح حل المثال وفق المخطط المبين في الشكل (2-3) :



الشكل (2-3)

وعليه تكون انثالبيية التكوين القياس ( $\Delta H_f^\circ$ ) للميثان كما يلي :

$$\begin{aligned}(\Delta H_f^\circ)_{CH_4} &= \Delta H_2^\circ + \Delta H_5^\circ + \Delta H_4^\circ \\&= -393.51 + (-483.58) + (802.37) \\&= -74.72 \text{ kJ}\end{aligned}$$

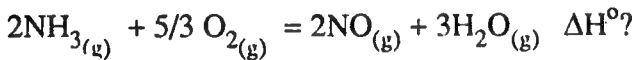
يتضح في المثال (3) امكانية ايجاد انثالبيية التكوين لاية مادة هيدروكربونية من قياس انثالبيية احتراقها الى غاز ثاني اوكسيد الكربون وماء اضافة الى انثالبيية احتراق كل من الهيدروجين والكربون الى ماء وثاني اوكسيد الكربون على التوالي .

### 6-3 انثالبيية الاحتراق القياس ( $\Delta H_c^\circ$ ) (Standard Enthalpy of combustion)

تعرف انثالبيية الاحتراق القياس بانها التغير في الانثالبيية الذي يرافق الاكسدة التامة لمول واحد من مادة تحت ظروف قياسية الى نواتج الاكسدة تحت نفس الظروف القياسية . ولتعيين انثالبيية الاحتراق القياس اهمية كبيرة خاصة لحساب انثالبيية التكوين القياس للمركبات الكيميائية .

#### مثال 4

(أ) احسب انثالبيية الاحتراق القياس ( $\Delta H_c^\circ$ ) لاحتراق الامونيا من المعادلة ادناه مستفيداً من انثالبيية التكوين القياس المدرجة في الجدول (1-3) .  
(ب) ما هو التغير في الانثالبيية لاحتراق (100) لتر من غاز الامونيا في درجة حرارة (25) مئوي وضغط واحد جو .



الحل :

( أ ) يبين هذا المثال كيفية حساب انثالية تفاعل ( انثالية الاحتراق في التفاعل اعلاه ) من انثالية التكوين للمواد المتفاعلة والناجمة مستفيدين من قانون هيس . واستناداً على هذا القانون فإن انثالية التفاعل اعلاه تساوي الى :

$$\Delta H^{\circ} = 2 \Delta H_f^{\circ} (\text{NO})_g + 3 \Delta H_f^{\circ} (\text{H}_2\text{O})_g - 2 \Delta H_f^{\circ} (\text{NH}_3)_g - 5/3 \Delta H_f^{\circ} (\text{O}_2)_g$$

وبالتعويض عن انثالية التكوين القياس لكل مادة، الجدول (1-3)، تصبح المعادلة كالآتي :

$$\Delta H^{\circ} = 2 \times 90.25 + 3 \times (-241.79) - 2 \times (-46.19) - 5/2 (0)$$

$$\Delta H^{\circ} = -452.49 \text{ kJ}$$

يمثل المقدار (-452.49) التغير في انثالية التفاعل اعلاه وهو لاحتراق مولين من الامونيا . وبما ان انثالية الاحتراق القياس هي للاحتراق التام لمول واحد من المادة، لذا فان انثالية الاحتراق القياس للامونيا تساوي الى :

$$(\Delta H_c^{\circ})_{\text{NH}_3(g)} = -\frac{452.49}{2} = -226.245 \text{ kJ}$$

(ب) ان التغير في الانثالية لاحتراق اي مقدار من مادة تساوي حاصل ضرب انثالية الاحتراق القياس لتلك المادة مضروبة بعدد مولات تلك المادة، ولذا وقبل اي شيء يجب ان نحسب عدد مولات الامونيا من المعلومات المعطاة في المثال . من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية فان عدد مولات الامونيا يساوي :

$$N_{(\text{NH}_3)} = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 100}{0.082 \times 298} = 4.09$$

وعليه فان التغير في الانثالية ( $\Delta H^{\circ}$ ) لاحتراق 4.09 من الامونيا تساوي :

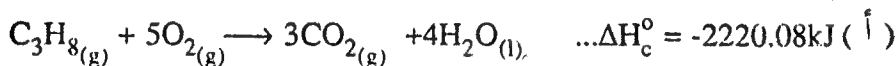


$$\Delta H^\circ = 4.09 \times (\Delta H_c^\circ)_{\text{NH}_3(\text{g})}$$

$$\Delta H^\circ = 4.09 \times (-226.245) = -925.342 \text{ kJ.}$$

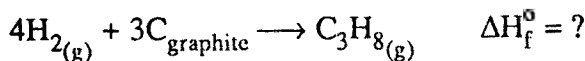
### مثال 5

احسب انثالية التكوين القياس لغاز البروبان ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) من انثالية الاحتراق لكل من البروبان ، الكربون ( الكرافيت ) ، والهيدروجين كما في التفاعلات التالية ) :

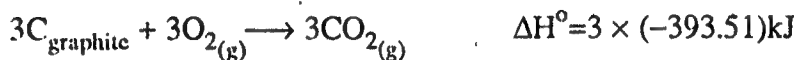
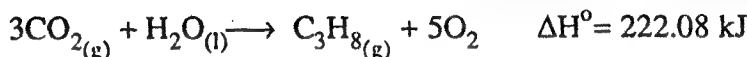


### الحل : الطريقة الاولى

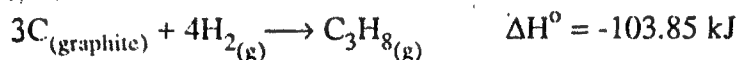
المطلوب في المثال هو حساب انثالية التكوين القياس لغاز البروبان، من عناصره المكونة اي انثالية القياس للتفاعل :



للحصول على المعادلة ( د ) من المعادلات ( أ ) ، ( ب ) ، و ( ج ) المبينة اعلاه نعكس المعادلة ( أ ) ونضرب المعادلة ( ب ) بالرقم (3) والمعادلة ( ج ) بالرقم (4) ثم نجمع المعادلات الناتجة جمعاً جبرياً كما مبين ادناه :



بالجمع



وعليه فان انثالبية التكوين القياس للبروبان تساوي

$$\Delta H_f^\circ(C_3H_8)_g = - 103.85 \text{ kJ.}$$

الطريقة الثانية :

تكون انثالبية الاحتراق في المعادلة ( أ ) كما يلي :

$$\Delta H_c^\circ = 3\Delta H_f^\circ(CO_2)_g + 4\Delta H_f^\circ(H_2O) - \Delta H_f^\circ(C_3H_8)_g - 0$$

وبالتعويض عن انثالبية التكوين القياس لغاز ثاني اوكسيد الكربون وانثالبية التكوين القياس السائل بما يساويهما من المعادلتين ( ب ) و ( ج ) على التوالي نحصل على :

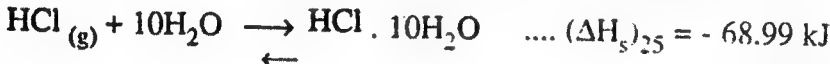
$$-2220.08 = 3 \times (-393.51) + 4 \times (-285.85) - \Delta H_f^\circ(C_3H_8)_g$$

ومنها نحصل على

$$\Delta H_f^\circ(C_3H_8)_g = - 103.85 \text{ kJ.}$$

### 7-3 انثالبية المحلول ( $\Delta H_s$ ) (Enthalpy of solution)

لتحضير محلول للمذاب معين في مذيب معين ، تذاب كمية معينة من المذاب في مقدار معين من المذيب ونتيجة لذلك يحدث تغير في الانثالبية ( انبعاث او امتصاص حرارة ) تعرف بانثالبية المحلول وتعتمد قيمتها على تركيز المحلول المتكون في درجة حرارة معينة . هذا ويطلق على التغير في الانثالبية لاذابة مول واحد من المذاب في (n) مول من المذيب لتكوين محلول بتركيز معين بالانثالبية التكاملية للمحلول (Integral Enthalpy of solution) . فمثلاً عند اذابة مول واحد من غاز كلوريد الهيدروجين في عشر مولات من الماء فان انثالبية التكاملية للمحلول تساوي الى (-68.99) كيلو جول كما في المعادلة (19-3) :



.....(3-19)

ويتم تحديد تركيز المحلول النهائي بدلالة الكسر المولي لمكوناته مثل الكسر المولي

$$\frac{1}{11} = \frac{1}{1+10} \quad \text{لـكلوريد الهيدروجين ( المذاب )}$$

$$\frac{10}{11} = \frac{10}{1+10} \quad \text{والكسر المولي للماء ( المذيب )}$$

لذا فان المقدار (-68.99 كيلو جول ) يمثل الانثالية التكاملية للمحلول لمول واحد من كلوريد الهيدروجين لتكوين محلول بالتركيب المذكور اعلاه . وتحسب الانثالية التكاملية للمحلول للتفاعل في المعادلة (19-3) كما يلي :

$$\Delta H_s = \Delta H_f ( \text{HCl} \cdot 10\text{H}_2\text{O} ) - \Delta H_f ( \text{HCl}_g ) \quad \dots\dots\dots(3-20)$$

يلاحظ ان المعادلة (20-3) لا تشمل انثالية تكوين الماء لانها قد اُهملت بسبب تساوي عدد مولات الماء في طرفي المعادلة (19-3) المتعادلة وهي الحالة في جميع المعادلات الكيميائية المتعادلة التي يتساوي فيها عدد مولات المذيب في طرفيها .

مثال 6 :

احسب انثالية التكوين لمحلول مكون من محلول واحد من كلوريد الهيدروجين في عشر مولات من الماء ، اي  $\Delta H_f( \text{HCl} \cdot 10 \text{H}_2\text{O} )$  ، من الانثالية التكاملية للمحلول المعطاة في المعادلة (19-3) وانثالية تكوين غاز كلوريد الهيدروجين المدرجة في الجدول (1-3) .

الحل :

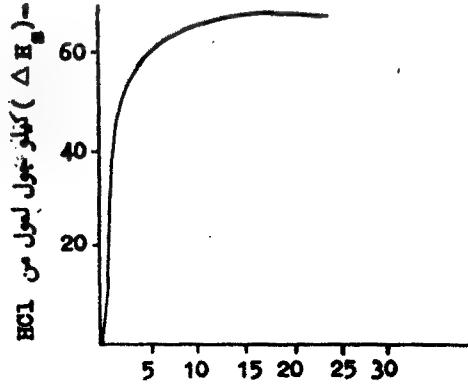
بالتعويض عن  $\Delta H_f( \text{HCl}_g )$  و  $(\Delta H_s)$  في المعادلة (20-3) ينتج

$$-68.99 = \Delta H_f ( \text{HCl} \cdot 10\text{H}_2\text{O} ) - (-92.30)$$

ومنها نحصل على

$$\Delta H_f (\text{HCl } 10\text{H}_2\text{O}) = 161.29 \text{ kJ}$$

يبين الرسم في الشكل (1-3) العلاقة بين الانثالبية التكاملية لمحلول كلوريد الهيدروجين في الماء في درجة (25) مئوية. يلاحظ من الشكل (3-3)

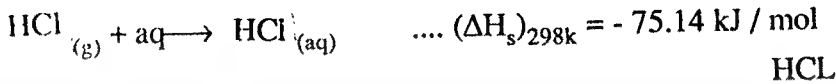


الشكل (3-3)

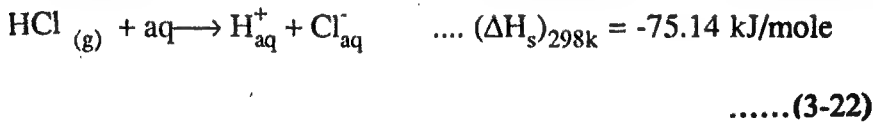
عدد مولات الماء لكل مول من HCl

ان  $(-\Delta H_s)$  لمول من (HCl) تزداد بصورة حادة كلما ازداد عدد مولات الماء، اي كلما اصبح المحلول الناتج اكثر تخفيفاً، الى ان تصل قيمة  $(-\Delta H_s)$  الى قيمة محددة تبقى ثابتة لا تتغير مهما زاد التخفيف، ويطلق حينئذ عليها بالانثالبية التكاملية للمحلول في التخفيف اللانهائي (Integral Enthalpy of solution at Infinite Dilution).

وعليه يمكن تعريف الانثالبية التكاملية للمحلول في التخفيف اللانهائي بانها تمثل التغير في الانثالبية الناتجة من اضافة المادة المذابة في كمية كبيرة من المذيب لدرجة ان اية اضافة جديدة من المذيب لا تؤدي الى اي تغير في الانثالبية. ويمكن تمثيل ذلك في حالة كلوريد الهيدروجين والماء بالمعادلة التالية:



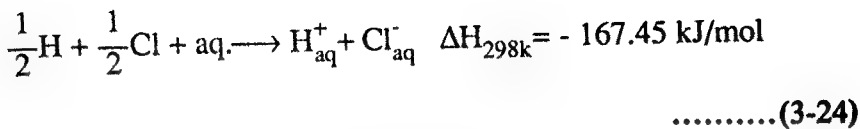
حيث الرمز (aq)، وهو اختصار للكلمة (aqueous) التي تعني مائي، يعني محلول مائي مخفف لدرجة بحيث ان اية مادة جديدة من الماء لا تؤدي الى تغير في الانثالبية، لذا فان  $(\text{HCl}_{aq})$  يعني محلول كلوريد الهيدروجين في ما لانهاية من التخفيف، وعليه تمثل  $(H_s = -75.14 \text{ كيلو جول})$  الانثالبية التكاملية للمحلول في التخفيف اللانهائي في المول من كلوريد الهيدروجين. يمكن كتابة المعادلة (21-3) كالآتي:



ومن انثالبية التكاملية للمحلول في التخفيف اللانهائي وانثالبية تكوين غاز كلوريد الهيدروجين يمكن حساب انثالبية تكوين ايون الكلوريد في المحلول كما يلي. من تعريف انثالبية تكوين غاز كلوريد الهيدروجين فإن:



ومن الجمع الجبري للمعادلتين (22-3) و (23-3) نحصل على المعادلة التالية:



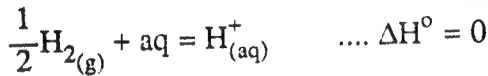
يمكن ان تكتب انثالبية التفاعل  $(\Delta H)$  في المعادلة (24-3) كما يلي:

$$\Delta H = \Delta H_f^{\circ} (\text{H}^{+})_{aq} + \Delta H_f^{\circ} (\text{Cl}^{-})_{aq} - \frac{1}{2} \Delta H_f^{\circ} (\text{H}_2)_g - \frac{1}{2} \Delta H_f^{\circ} (\text{Cl}_2)_g$$

وبالتعويض عن القيم المعلومة نحصل على المعادلة:

$$-167.45 = \Delta H_f^{\circ} (\text{H}^{+})_{aq} + \Delta H_f^{\circ} (\text{Cl}^{-})_{aq} - 0 - 0 \quad (3-25)$$

التي تدل على ان المقدار (-167.45 كيلو جول ) يمثل مجموع انثالبي التكوين لايوني الهيدروجين والكلوريد في المحلول ( او انثالية التكوين لكلوريد الهيدروجين في محلول مائي مخفف الى ما لانهاية ) . وباعتماد القيمة صفر لانثالية التكوين لايون الهيدروجين في المحلول المائي  $H_f^\circ(H^+)_{aq}$  = صفر ) ، اي ان

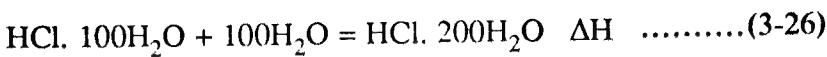


امكن تعيين قيم ( نسبية ) لانثاليات التكوين لعدد من الايونات ( الجدول 2-3 ) الان بتعويض  $\Delta H_f^\circ(H^+)_{aq}$  = صفر في المعادلة (25-3) يمكن حساب انثالية تكوين ايون الكلوريد كما يلي :

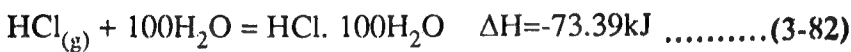
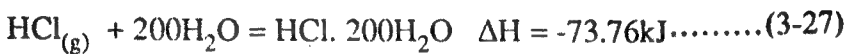
$$-167.45 = 0 + \Delta H_f^\circ(Cl^-)_{aq} \quad \dots \Delta H_f^\circ(Cl^-)_{aq} = -167.45 \text{ kJ/mol.}$$

او ان

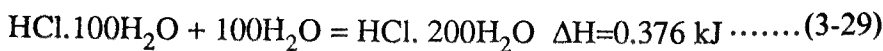
عند تخفيف محلول باضافة زيادة من المذيب يحدث تغيراً في الانثالية يعرف بانثالية التخفيف Enthalpy of Dilution . فمثلاً يمثل التغير في الانثالية نتيجة تخفيف محلول (0.555) مولالي من  $HCl$  (  $HCl \cdot 100 H_2O$  ) الى محلول 0.278 مولالي (  $HCl \cdot 200 H_2O$  ) باضافة (  $100 H_2O$  ) كما في المعادلة :



ولايجاد انثالية التخفيف للمعادلة (26-3) يستفاد من المعادلتين التاليتين



والان بعكس المعادلة (28-3) وطرحها جبرياً من المعادلة (27-3) نحصل على المعادلة التالية :



التي هي نفس المعادلة (26-3) والتغير في الانثالبية (H) = 0.376 كيلو جول ( يمثل انثالبية التخفيف .

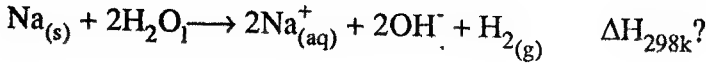
يلاحظ مما تقدم ان انثالبية التخفيف هي الفرق بين انثالبيتي تكامل محلول بين تركيزين معلومين ومختلفين .

الجدول (2-3) : انثالبية تكوين الايونات في المحلول المائي في درجة 25 مئوي .

$\Delta H_{fo}$ الايون	$\Delta H_{fo}$ كيلو جول/مول	$\Delta H_{fo}$ الايون	$\Delta H_{fo}$ كيلو جول/مول	$\Delta H_{fo}$ الايون	$\Delta H_{fo}$ كيلو جول/مول
$\text{H}^+$	0	$\text{NH}_4^+$	132.80-	$\text{NO}_3^-$	206.56-
$\text{Li}^+$	278.46-	$\text{Ba}^{++}$	538.36-	$\text{SO}_4^{2-}$	-907.51-
$\text{Na}^+$	239.66-	$\text{OH}^-$	229.94-	$\text{ClO}_4^-$	131.41-
$\text{K}^+$	251.21-	$\text{F}^-$	329.11-	$\text{PO}_4^{3-}$	1284.1-
$\text{Ag}^+$	105.90-	$\text{Cl}^-$	167.46-	$\text{HPO}_4^{2-}$	1298.7-
$\text{Mg}^{++}$	461.95-	$\text{Br}^-$	120.92-		
$\text{Cu}^{++}$	64.39-	$\text{I}^-$	55.94-		
$\text{Zn}^{++}$	152.42-	$\text{CO}_3^{2-}$	676.26-		

مثال (7)

في المعلومات المتوفرة في الجدول (2-3) احسب انثالية التفاعل التالي في درجة 25 م°:



الحل

نحسب حرارة التفاعل اعلاه كما يلي:

$$\Delta H = 2 H_f^\circ (\text{Na}_{aq}^+) + 2\Delta H_f^\circ (\text{OH}_{aq}^-) + \Delta H_f^\circ (\text{H}_{2(g)}) - 2\Delta H_f^\circ (\text{NO}_3) - 2\Delta H_f^\circ (\text{H}_2\text{O})$$

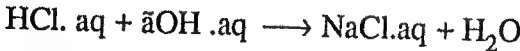
ومن قيم انثاليات التكوين القياس المدونة في الجدولين (1-3) و (2-3) وتعويضها في المعادلة اعلاه نحصل على حرارة التفاعل:

$$\Delta H_{298} = 2 \times (-239.66) + 2(-229.94) + (0) - 2(0) - 2(-285.85)$$

$$\Delta H_{298} = -367.5 \text{ kJ.}$$

### 8-3 انثالية التعادل (Enthalpy of Neutralization)

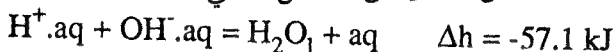
تعرف انثالية التعادل بانها التغير في الانثالية نتيجة تفاعل حامض مع قاعدة في محلول مخفف الى ما لانهاية. لناخذ على سبيل المثال تفاعل مول من حامض الهيدروكلوريك المائي (HCl.aq) مع مول من هيدروكسيد الصوديوم المائي (NaOH aq) في درجة حرارة (25) مئوية وضغط واحد جو كما في المعادلة التالية:



تمثل القيمة (-57.1) كيلو جول انثالية تفاعل مول واحد من ايون (H+) مع واحد من ايون (OH-) في حالة حامض قوي مع قاعدة قوية وتعرف بانثالية التعادل وتكون ثابتة تقريباً. لقد فسرت هذه الشبوتية في انثالية التعادل على اساس ان كلا من الحامض والقاعدة يمثلان الكتروليتات قوية تتأين كلياً في المحاليل



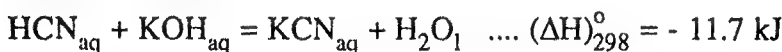
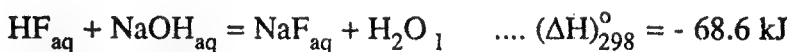
المخفضة الى ما لانهاية الى ايوناتها المكونة . وبما ان الملح المتكون (NaCl) هو الاخر الكتروليتا قويا فلذلك يتوقع ان يقتصر التفاعل على ايونات (H<sup>+</sup>) و (OH<sup>-</sup>) لتكوين الماء الضعيف التاين جداً ويبقى الملح بشكل ايونات محاطة بجزيئات الماء متفككة متباعدة . لذا يمكن التعبير عن التفاعل كما يلي :



وعليه فان التغير في الانثالية هو في الحقيقة للتفاعل بين ايونات (H<sup>+</sup>) و (OH<sup>-</sup>) بغض النظر عن مصدرهما .

اما في حالة الحوامض الضعيفة والقواعد الضعيفة فان الحال يختلف اذ ان قسماً من الحامض يتأين ليعطي ايونات (H<sup>+</sup>) مع تايين قسم مكافيء من القاعدة ليعطي ايونات (OH<sup>-</sup>) . وعليه فان انثالية التفاعل في هذه الحالة تشمل ، الى انثالية تفاعل (H<sup>+</sup>) مع ايونات (OH<sup>-</sup>) لتكوين ماء غير متاين . تغيراً في الانثالية بسبب تايين الحامض الضعيف والقاعدة الضعيفة في المحلول خلال التفاعل ، ومثال على ذلك تفاعل حامض الخليك مع هيدروكسيد الامونيوم .

اما انثالية تعادل حامض قوي مع قاعدة ضعيفة او بالعكس فيتضمن التأين الكامل للالكتروليت القوي مع التاين الجزئي للالكتروليت الضعيف . وان القسم غير المتأين من الالكتروليت الاخير يبدأ بالتأين ويستمر التاين الى ان ينتهي التفاعل . ويمكن حساب انثالية التعادل بالجمع الجبري لجميع معادلات التأين والتعادل وتفاعل ايوني (H<sup>+</sup>) و (OH<sup>-</sup>) . وقد تكون قيمة انثالية التعادل اكبر او اقل من (-57.1) كيلو جول كما مبين في التفاعلين التاليين :



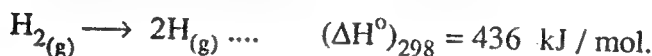
### 9-3 انثالية الاصرة (Bond Enthalpy)

تعرف الطاقة اللازمة لتفكك الاصرة (A-B) وتكوين الذرتين (A) و (B)

كما في المعادلة :



بطاقة تفكك الاصرة (A-B) (Bond Dissociation Energy) ويرمز لها بـ  $DH^\circ(A-B)$ . ان هناك عدد من التعاريف لطاقة تفكك الاصرة الا اننا سوف نتبع التعريف الذي اقترحه اس. دبليو. بنزن (S.W.Benson) حيث عرفت طاقة تفكك الاصرة بانها التغير في الانثالية للفاعل الكيميائي الذي يتضمن تفكك مول واحد من اصر محددة وفضل الذرتين، او الجذرين، المكونين لها عن بعضها البعض، اي  $\Delta H^\circ$  الى التفاعل الكيميائي، وعليه فان  $DH^\circ(A-B)$  للاصرة (A-B) في التفاعل (3-30) تعد بمثابة  $(\Delta H^\circ_{298})$  التفاعل. فبالنسبة للجزيئات ثنائية الذرة كجزيئة الهيدروجين، فان انثالية التفاعل تمثل انثالية الاصرة كما في التفاعل:



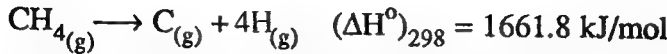
في حالة الاواصر المتواجدة في الجزيئات متعددة الذرات فان المعلومات التي تعطى في معدل انثاليات الاواصر، حيث من الضروري وضع بعض الافتراضات لاجل الحصول على قيم تتلائم مع الجزيئات المختلفة. ومن هذه الافتراضات:

1 — اعتبار تشابه الاواصر من النوع الواحد كاصرة (C-H) في الميثان واصرة (C-C) في البروبان. ولو ان ذلك ليس بالصحيح كلياً فمثلاً يلاحظ بعض الاختلاف في قيم تفكك الاواصر في التفاعلات التالية:—



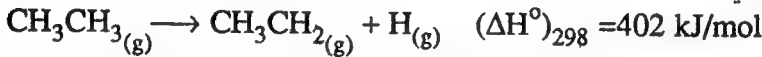
\* S. W. Benson , J. Chem. Educ. , 24 , 502 (1965)

يلاحظ بعض الاختلاف في قيم انثاليات تفكك الاصرة الا انه اذا جمعنا هذه القيم الاربع لانتاليات تفكك الاصرة وقسمناه على اربعة فيكون ناتج القسمة 414.3 كيلو جول للمول بمثابة معدل انتالية الاصرة (C-H) في الميثان وهي مقارنة لقيمة معدل انتالية الاصرة التي يحصل عليها من انتالية التذرية (Enthalpy of Atomization) للميثان كما في التفاعل التالي :



تمثل هذه القيمة (1661.8) كيلو جول للمول انتالية التذرية للميثان وربعها الذي يساوي الى (415.45) كيلوجول للمول ، يعطي قيمة انتالية الاصرة .

2 — ان انتاليات الاواصر لا تعتمد على الجزيئات التي تتواجد فيها ، فمثلاً انتالية الاصرة (C-H) في الميثان هي نفسها في الايثان او البروبان . ولو ان التفاعل التالي :



يحتاج تقريباً (402) كيلو جول لتفكك مول واحد من اصرة (C-H) مقارنة بالقيمة (431) كيلو جول لتفكك مول واحد من هذه الاصرة في الميثان ، الا ان باقي اواصر (C-H) تحتاج انتاليات تقع قيمها ضمن هذه المدى .

ان التغير في الانتالية الذي يصاحب التفكك التام لجزيئة الى ذريتها المكونة في الحالة الغازية يعد مساوياً الى مجموع انتاليات تفكك جميع الاواصر الكيسائية التي تتضمنها الجزيئة . فمثلاً في حالة جزيئة الكحول الميثيلي :



فان  $(\Delta H^\circ)$  في التفاعل (3-36) تعرف بمجموع انتالية اواصر الكحول الميثيلي وتساوي الى : (  $\times 4$  معدل انتالية الاصرة (C-H) + معدل انتالية الاصرة (C-O) + معدل انتالية الاصرة (O-H) ) .

لقد تم التوصل الى قيم مقبولة، بالاستعانة بالمعلومات اللازمة، لمعدل  
الانثالبيية للعديد من الاواصر الكيميائية، الجدول (3-3).

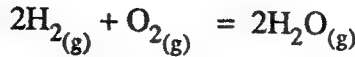
الجدول (3-3): معدل انثالبيات بعض الاواصر في درجة 25 مئوي .

$\Delta H^0$		$\Delta H^0$		$\Delta H^0$	
كيلو جول/مول	الاصرة	كيلو جول /مول	الاصرة	كيلو جول/مول	الاصرة
161	N-N	711.28	C=O	436	H-H
945.58	N $\equiv$ N	348	C-C	563	H-F
391	N-H	615.05	C=C	432	H-Cl
339	H-S	811.7	C $\equiv$ C	366	H-Br
				299	H-I
259	C-S	292	C-N	139	O-O
185	F-F	878.64	C $\equiv$ N	493.7	O=O
243	Cl-Cl	441	C-F	463	O-H
193	Br-Br	328	C-Cl	413	C-H
151	I-I	276	C-Br	351	C-O
717	C <sub>(S)</sub> (graphite)		—————>	C <sub>(g)</sub>	

وباستخدام هذه القيم لمعدل انثالية الاصرة اصبح من الممكن تعيين انثاليات تكون مركبات عديدة وانثاليات تفاعلات مختلفة يصعب تعيين قسم منها او يستحيل بالطرق التجريبية. يمكن القول بصورة عامة ان التغير في انثالية تفاعل = مجموع انثاليات الاواصر المنشطرة — مجموع انثاليات الاواصر المتكونة. من المهم استخدام الاشارة المناسبة لانثالية الاصرة في الحسابات سواء لتكوين الاصرة او تفككها.

#### مثال (8)

احسب انثالية التفاعل التالي مستعيناً بالجدول (3-3) للحصول على المعلومات اللازمة:



#### الحل

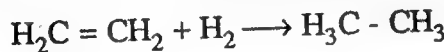
يتضمن التفاعل انشطار مولين من اواصر (H-H) ومول واحد من اواصر (O=O). وعليه فان انثالية التفاعل تساوي الى:

$$\Delta H = 2(436) + (493.7) - 4(463) = - 486.3 \text{ kJ}$$

ولتكون مول واحد من الماء في المعادلة اعلاه. فان التغير في الانثالية يساوي الى نصف القيمة المحسوبة اي (-243.15) كيلو جول للمول وهي مقاربة جداً لانثالية تكوين الماء في الحالة الغازية الذي يساوي (-241.79) كيلو جول للمول.

#### مثال (9)

من المعلومات المتوفرة في الجدول (3-3) احسب حرارة التفاعل:



الحل

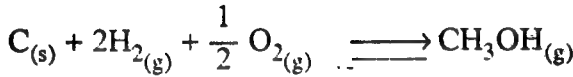
يتضمن التفاعل انشطار مول واحد من اصرة (C=C) ومول واحد من اصرة (H-H) وتكون مول واحد من اصرة (C-C) ومولين من اصرة (C-H) . وعليه فان اثنائية التفاعل تساوي :

$$\Delta H = 615.05 + 346 - 348 - 2(413) = - 122.95 \text{ kJ}$$

يعرف التغير في الاثنائية اعلاه باثنائية الهدرجة (Enthalpy of Hydro genation)

مثال (10)

احسب حرارة التفاعل :



مستفيدة من المعلومات الواردة في حلي المثالين (8) و (9)

الحل

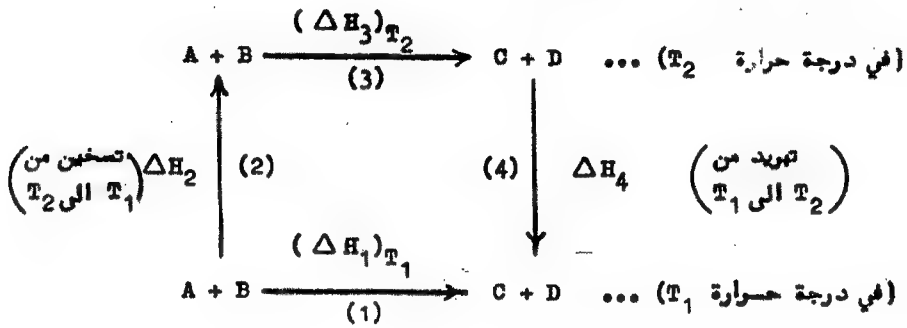
يتضمن التفاعل المذكور (1) عملية تذبذبة الكربون الصلب ( كرافيت ) الى الكربون الذري بالحالة الغازية وانشطار مولين من اصرة (H-H) ونصف مول من اصرة (O=O) و (2) تكون ثلاث مولات من اصرة (C-H) ومول واحد من اصرة (C-O) ومول واحد من اصرة (O-H) ، وعليه تصبح اثنائية التفاعل كالآتي :

$$\begin{aligned} (\Delta H^0)_{298} &= 716.68 + 2(436) + \frac{1}{2} (493.7) - 3(413) - (351) - (463) \\ &= -217.47 \text{ kJ / mol} \end{aligned}$$

ان هذه القيمة (-217.47) كيلو جول للمول مقارنة لاثنائية تكون غاز الكحول الميثيلي المعينة تجريبياً والتي تساوي (-201.17) كيلو جول للمول .

### 10-3 تأثير درجة الحرارة على $\Delta H$

ان قيم انثالية التكوين المدرجة في الجدول (3-1) مخصصة لدرجة حرارة (298) مطلقة، اي ان المواد المتفاعلة والناجمة في درجة حرارة (298) مطلقة. ولاجل معرفة انثالية التكوين في درجة حرارة اخرى فاننا بحاجة الى معادلة تبين اعتماد الانثالية على درجة الحرارة. وللتوصل الى مثل هذه المعادلة نتصور المخطط (3-3)، حيث تمثل الخطوة (1) تفاعلاً معيناً في :



المخطط (3-3)

درجة حرارة معلومة ( $T_1$ ) وانثالية معلومة ( $\Delta H_1$ ) في درجة حرارة معينة ( $T_2$ ) اما الخطوة (2) فتمثل عملية تسخين المواد المتفاعلة (B,A) من درجة حرارة ( $T_1$ ) الى درجة حرارة ( $T_2$ ) وتمثل الخطوة (4) عملية تبريد المواد الناجمة (D,C) من

درجة حرارة ( $T_2$ ) الى درجة حرارة ( $T_1$ ) هذا وان جميع الخطوات المذكورة اجريت تحت ضغط ثابت مساو الى واحد جو. ولحساب ( $\Delta H_3$ ) يمكن الاستفادة من حقيقة ان التغير في الانثالية لاي تفاعل يعتمد فقط على الحالة الابتدائية والنهاية ولا يعتمد على الطريق الذي يسلكه التفاعل لتحويل من مواد متفاعلة الى نواتج التفاعل. وعليه فان ( $\Delta H_1$ ) للخطوة (1) يجب ان يساوي الى مجموع التغيرات في الانثاليات التي تصاحب الخطوة (2)، (3) و (4) اي ان :

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 \quad \dots\dots\dots(3-31)$$

حيث نحسب كما يلي :

$$(\Delta H_1)_{T_1} = \Delta H_f^\circ(C) + \Delta H_f^\circ(D) - \Delta H_f^\circ(A) - \Delta H_f^\circ(B) \quad \dots\dots\dots(3-32)$$

علماً أن  $(\Delta H_f^\circ)$  تمثل انثالبيات التكوين للمواد المتفاعلة والنتائج في درجة حرارة  $T_1$  وأن  $(H_2)$  انثالية تسخين المواد المتفاعلة من درجة حرارة  $(T_1)$  الى درجة حرارة  $(T_2)$  ولكون العملية لا تتضمن اي تغيير في الحالة لذا فان :

$$\Delta H_2 = \int_{T_1}^{T_2} \{ C_p(A) + C_p(B) \} dT \quad \dots\dots\dots(3-33)$$

حيث  $(C_p)$  السعة الحرارية تحت ضغط ثابت للمواد المتفاعلة . ونحسب  $(\Delta H)_3$  ، انثالية التفاعل في درجة حرارة  $(T_2)$  ، كما يلي :

$$(\Delta H_3)_{T_2} = \Delta H_f^\circ(C) + \Delta H_f^\circ(D) - \Delta H_f^\circ(A) - \Delta H_f^\circ(B) \quad \dots\dots\dots(3-34)$$

وهنا تمثل  $(\Delta H_f^\circ)$  انثالبيات التكوين القياس للمواد المتفاعلة والنتائج في درجة حرارة  $(T_2)$  . اما  $(\Delta H_4)$  المصاحبة لعملية تبريد نتائج التفاعل من درجة حرارة  $(T_2)$  الى درجة حرارة  $(T_1)$  فتحسب من المعادلة :—

$$\Delta H_4 = \int_{T_2}^{T_1} \{ C_p(C) + C_p(D) \} dT \quad \dots\dots\dots(3-35)$$

وبتعويض المعادلتين (33-3) و (34-3) في المعادلة (31-3) ينتج :



$$\Delta H_1 = \int_{T_1}^{T_2} \{C_p(A) + C_p(B)\} dT + \Delta H_3 + \int_{T_2}^{T_1} \{C_p(C) + C_p(D)\} dT$$

.....(3-36)

وبتغير حدود التكامل للحد الاخير للطرف الايمن من المعادلة (36-3) واعادة ترتيب المعادلة الناتجة نحصل على :

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \int_{T_1}^{T_2} \{C_p(C) + C_p(D)\} dT - \int_{T_1}^{T_2} \{C_p(A) + C_p(B)\} dT$$

.....(3-37)

وبما ان

$$\Delta C_p \equiv C_p(C) + C_p(D) - C_p(A) - C_p(B)$$

لذا يمكن كتابة المعادلة (37-3) بالشكل التالي :

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

.....(3-38)

وهكذا اصبح ممكناً حساب  $(\Delta H_3)$  للتفاعل في درجة حرارة  $(T_2)$  من قيم السعات الحرارية تحت ضغط ثابت للمواد المتفاعلة والناتجة ومن قيمة  $(\Delta H_1)$  المعلومة للتفاعل في درجة حرارة  $(T_1)$  .

اما في حالة اعتماد قيمة  $(C_p)$  ، لكل مادة من المواد المتفاعلة ونواتجات التفاعل على درجة الحرارة وفق العلاقة التالية :

$$C_p = a + bT + cT^2 + \dots$$

فانه يمكن حساب  $(\Delta C_p)$  كما يلي :

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^2 + \dots \quad \dots\dots\dots(3-39)$$

وبتعويض المعادلة (39-3) في المعادلة (38-3) تنتج المعادلة التالية :

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \int_{T_1}^{T_2} (\Delta a + \Delta bT + \Delta cT^2) dT \quad \dots\dots\dots(3-40)$$

وبتكاملها نحصل على :

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta a (T_2 - T_1) + \Delta b (T_2^2 - T_1^2) + \Delta c (T_2^3 - T_1^3) + \dots \quad \dots\dots\dots(3-41)$$

وباستخدام المعادلة (41-3) يمكن حساب  $(\Delta H_3)$  من المعلومات المتوفرة اما في حالة عدم اعتماد السعات الحرارية  $(C_p)$  للمواد المتفاعلة ونواتج التفاعل على درجة الحرارة الى درجة كبيرة، اي ان قيم  $(C_p)$  تبقى ثابتة على مدى درجات الحرارة المتوفرة كان يكون الفرق بين  $T_2$  و  $T_1$  ليس بالكبير، فان  $(\Delta C_p)$  في هذه الحالة يكون مقدار ثابت يمكن اخراجه خارج التكامل وتصبح المعادلة (38-3) بعد تكاملها كالآتي :

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta C_p (T_2 - T_1) \quad \dots\dots\dots(3-42)$$

والتي يمكن بواسطتها حساب  $\Delta H_3$  من قيم  $(\Delta H_1)$ ,  $(\Delta C_p)$ ,  $(T_1)$  و  $(T_2)$ .

### مثال (11)

احسب حرارة انصهار الماء في درجة (263) مطلقة اذا علمت ان حرارة انصهاره في درجة حرارة (273) مطلقة تساوي (6.01) كيلو جول للمول وان ( $C_p$ ) للماء السائل تساوي (75) جول/مط. مول. وللجليد تساوي (33) جول/مط. مول ، على افتراض ان  $C_p$  الماء السائل و  $C_p$  الجليد لاتعتمدان على درجة الحرارة .

### الحل

حرارة انصهار الماء في درجة (263) مطلقة يمكن حسابها باستخدام المعادلة (42-3). أولاً يجب حساب ( $C_p$ ) كما يلي :

$$\Delta C_p = 75 - 33 = 42 \text{ Jk}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

ومن المعادلة (42-3)

$$\Delta H_{263} = \Delta H_{273} + \Delta C(T_2 - T_1)$$

فان

$$\begin{aligned} \Delta H_{263} &= 6010 + 42 (263 - 273) \\ &= 5590 \text{ J mol}^{-1} \end{aligned}$$

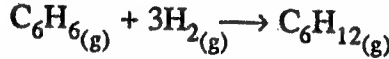
### اسئلة الفصل الثالث

1 — احسب مقدار الحرارة الناتجة من احتراق متر مكعب واحد من غاز الميثان تحت الظروف الاعتيادية ( صفر مئوي وضغط واحد جو ) مستفيداً من المعلومات المتوفرة في الجدول (3-1).

( الجواب 35827.76 كيلو جول )

2 — عند الاحتراق التام للغازات التالية  $H_2$  و  $CH_4$  و  $CH_3OH$  و  $C_2H_4$  و  $C_2H_2$  و  $CH_3CH_2OH$  و  $C_3H_8$  ينتج غاز ثاني اوكسيد الكربون والماء السائل. من المعلومات المتوفرة في الجدول (1-3) احسب حرارة احتراق كل غاز، وبين اي من هذه الغازات افضل وقوداً اذا اريد استخدامه كوقود. احسب التغيرات في الطاقة لتفاعلات الاحتراق.

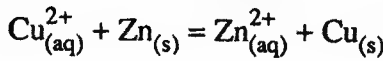
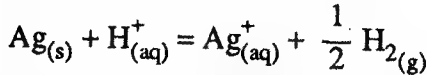
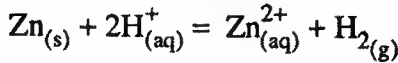
3 — اذا علمت ان حرارة الاحتراق القياس في درجة (298) مطلقة  $(\Delta H_{298}^\circ)$  للمواد الهيدروجين، البنزين، والسايكلوهكسان هي  $(-3169.46)$  و  $(-241.84)$  و  $(-3988.91)$  كيلو جول مول<sup>-1</sup> على التوالي. احسب  $(H_{298}^\circ)$  للتفاعل:



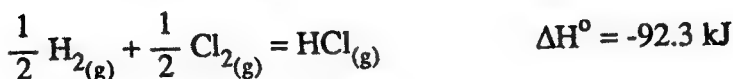
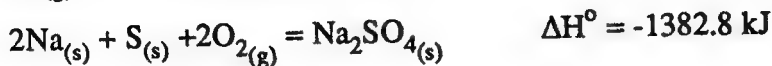
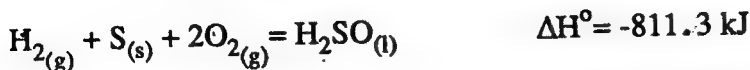
احسب  $(\Delta H_{298}^\circ)$  لهذا التفاعل في درجة حرارة (125) مئوي اذا علمت ان : السعات الحرارية المولارية لغاز البنزين  $(C_6H_6)$  هي  $(C_p = 2.8 + 0.059 T)$  و لغاز  $(H_2)$  هي  $(C_p = 6.9)$  و لغاز السايكلوهكسان هي  $(C_p = 2.6 + 0.096 T)$  على مدى درجات الحرارة من 290 الى 400 مطلقة.

( الجواب -206.06، -211.59 كيلو جول )

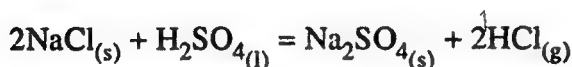
4 — من المعلومات المتوفرة في الجدول (2-3) احسب  $(\Delta H^\circ)$  للتفاعلات :



5 — من المعلومات المتوفرة في التفاعلات التالية في درجة حرارة (25) مئوية:



احسب (ΔH) للفتاعل التالي في درجة حرارة (25) مئوية :

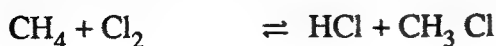
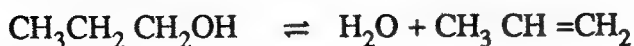


6 — احسب التغير في الانثالية لتخفيف محلول (HCl.100H<sub>2</sub>O) الى تخفيف لانهائي مستفيداً من المعلومات التالية :

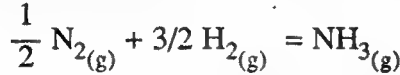


7 — من انثاليات الاواصر المتوفرة في الجدول (3-3) احسب انثالية التكوين للبروبان ، C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub> ، (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NH .

8 — من المعلومات المتوفرة في الجدول (3-3) احسب (H) للتفاعلات الغازية التالية :



9 — احسب لانتالبية التفاعل التالي في درجة حرارة (25) مئوية ( $H^{\circ}_{298}$ )



مستخدماً انتالبيات التكوين القياس المدونة في الجدول (1-3) ثم احسب انتالبية نفس التفاعل من درجة حرارة (500) مئوية اذا علمت ان :

$$C_p(NH_3)_g = 25.895 + 33 \times 10^{-3} T - 30.46 \times 10^{-7} T^2 \text{ kJ k}^{0-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$C_p(N_2)_g = 27.372 + 5.23 \times 10^{-3} T - 0.03 \times 10^{-7} T^2 \text{ kJ k}^{0-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$C_p(H_2)_g = 29.066 - 0.83 \times 10^{-3} T + 20.12 \times 10^{-7} T^2 \text{ kJ k}^{0-1} \text{ mol}^{-1}$$

( الجواب =  $\Delta H^{\circ}_{298} = -46.2$  كيلو جول مول<sup>-1</sup> ،  $\Delta H^{\circ}_{773} = -54$  كيلو جول مول<sup>-1</sup> )

## الفصل الرابع

### القانون الثاني للدينامية الحرارية

#### Second Law of Thermodynamic

بالرغم من ان القانون الاول يحدد العلاقة بين الحرارة الممتصة والشغل الذي تقوم به المنظومة، وينص على انه عند تحول الطاقة من صورة الى اخرى يبقى مجموع الطاقة محافظ عليه، الا ان هذا القانون لا يوضع تحديدات على مصدر الطاقة الحرارية ولا على اتجاهها. حسب القانون الاول لا توجد استحالة في استخدام الجليد لتسخين الماء باستعمال الطاقة المخزونة في الجليد.

كما ان القانون الاول لا يوضع تحديدا على امكانية انتقال الحرارة من مصدر بارد الى مصدر ساخن. كما لا يعتبر جريان الماء من المستوى الأدنى الى المستوى الأعلى عملية مستحيلة.

يحدد القانون الثاني امكانية حدوث مثل هذه العمليات كما انه ينبؤنا بالعمليات التي يمكن أن تحدث بصورة تلقائية، مثل انتقال الحرارة في قضيب حديدي من الطرف الساخن الى الطرف البارد وليس العكس. وهنالك شواهد لانتحصى ولاتعد للعمليات التي تكون احادية الاتجاه في الطبيعة. وبما ان هذه العمليات تحدث تغيرات في الطاقة لذا تبرز ضرورة وجود دالة دينامية حرارية يكون بمقدورها قياس هذه التغيرات عندما تتغير المنظومات من حالة الى اخرى. والدالة الملائمة لهذا الغرض هي الانتروبي التي يرمز لها بالحرف  $S$  وان تغير الانتروبي  $\Delta S$  هو الذي يخبرنا فيما اذا كان بالامكان ان تكون أية عملية تغير فيزيائي، أو عملية تفاعل كيميائي عملية تلقائية أم لا، والانتروبي هو دالة لحالة والدليل على ذلك هو ان الطريقة التي تتوزع فيها الطاقة هي خاصية للمنظومة الجديدة. وهناك تعريفان لهذه

الدالة، تعريف احصائي واخر دينامي حراري. يتعلق الاول بحساب الطاقة المتبعة بين المكونات، بينما يختص الاخر بالتغير الحراري وحالة من علاقة في تغيير الطاقة للمنظومة. ان التغير في الانتروبي ds عبارة عن تفاضل مضبوط، وسنتناول في هذا الفصل الانتروبي.

## 1-4 الانتروبي S (الاختلاج) Entropy

لقد اصبح بالامكان الان ادخال الدالة الجديدة في موضوع الدينامية الحرارية وهي الانتروبي التي تكمل مجموعة المقادير الدينامية الحرارية التي تعتمد على حالة المنظومة المعزولة اذ ان الانتروبي يعتمد على الحالة الاولى والنهائية للمنظومة كما هو الحال في H و لذلك من الممكن كتابة التغير في الانتروبي:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad \text{.....(4-1)}$$

حيث ان  $S_1$  و  $S_2$  يمثلان انتروبي المنظومة في الحالة الابتدائية والنهائية على التوالي. وبما ان الطاقة الحرارية هي حالة عشوائية واذا ما سخنت المنظومة فستوقع ازدياد الانتروبي. ومن هنا يمكن مساواة التغير في الانتروبي التفاضلي ds مع كمية الحرارة المضافة dq الا انه لا يوضح هذا لسببين الاول ان q هي دالة مسلك وليست دالة حالة، وثانياً ان تعريف الانتروبي يجب ان يأخذ بالاعتبار درجة حرارة المنظومة، فانتقال كمية من الحرارة الى جسم بارد يسبب عشوائية اكبر مما اذا انتقلت الى جسم حار، وعليه نجد ان اوسط فرضية ان نضعها هي ان وضع dq على العشوائية يتناسب عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة T. لذلك نحاول ان نشخص التغير في الانتروبي بالمقدار  $dq/T$ . ولا يمكن ان يكون المقدار  $(dq/T)$  دالة حالة ما لم يجري عليه تحويل. ذلك هو تقييد هذه التغيرات بانتقالات عكوسة للحرارة. عندئذ نجد ان  $dq_{rev}/T$  تكون دالة حالة. وعليه يكون التعريف الدينامي الحراري للانتروبي هو

$$dS = \frac{dq_{rev}}{T} \quad \text{.....(4-2)}$$



ان الانتروبي يمثل بنسبة تأثير العشوائية  $dq_{rev}$  الى مقياس كمية العشوائية التي هي درجة الحرارة  $T$ . وفي حالة تغير رجوعي محدود عند درجة حرارة ثابتة تكتب  $ds$  بشكل  $\Delta S$  وتصبح  $dq_{rev}$  بشكل  $q_{rev}$  اي ان المعادلة (4-2) تكتب بالشكل:

$$\Delta S = \frac{q_{rev}}{T} \quad \dots\dots\dots(4-3)$$

تعتمد اشارة  $\Delta S$  على كمية الحرارة  $q_{rev}$ . فاذا كانت موجبة فتكون اشارة  $\Delta S$  موجبة واذا كانت سالبة فان اشارة  $\Delta S$  سالبة.

بما ان الانتروبي  $S$  هو دالة لحالة المنظومة فان التكامل لعملية دورية عكوسة يكون صفراً. أي ان:

$$\Delta S = \oint \frac{dq_{rev}}{T} = 0 \quad \dots\dots\dots(4-4)$$

وللبرهنة على ذلك يمكن تصور غاز في اسطوانة فيها مكبس عديم الوزن والاحتكاك موضوعة داخل مستودع حرارة. فاذا تمدد الغاز بامتصاص كمية من الحرارة  $q_r$  في درجة حرارة ثابتة  $T$  فان تغير انتروبي هذه المنظومة  $\Delta S_s$  يكون:

$$\Delta S_s = \frac{q_r}{T}$$

أما المستودع ( المحيط ) فقد خسر كمية من الحرارة مساوية لـ  $q_r$  لذلك يكون تغير انتروبي المحيط او المستودع:

$$\Delta S_r = - \frac{q_r}{T}$$

وبذلك فان التغير الكلي للمنظومة والمستودع:

$$\Delta S' = \Delta S_s + \Delta S_r = \frac{q_r}{T} - \frac{q_r}{T} = 0$$

ولو اعيدت العملية بانضغاط الغاز برجع المكبس الى مكانه الاول فان:

$$\Delta S_r = \frac{q_r}{T} \quad \text{و} \quad \Delta S_s = - \frac{q_r}{T}$$

حيث يخسر الغاز كمية الحرارة وبأخذها المستودع فتكون  $\Delta S$  في هذه الحالة ايضاً مساوية للصفر والعملية الكلية الدورية هي:

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 0$$

أما في العمليات غير العكوسة فتكون  $\Delta S > 0$  . وذلك عند تمدد الغاز بهذه الطريقة فإنه يمتص كمية من الحرارة  $q$  أقل مما لو أجريت العملية بطريقة عكوسة أما تغير انتروبي الغاز فيتعين بامتصاص الحرارة بطريقة عكوسة أي ان  $\Delta S_g = -(q_r/T)$  وليس بالحرارة الممتصة فعلا . بينما خسارة المستودع للحرارة  $q$  هي التي تقرر قيمة تغير انتروبي المستودع أي ان  $\Delta S_r = -q/T$  بالرغم من اعتبار عملية خسارة كمية الحرارة هذه عملية عكوسة الا انه كما ذكرنا سابقا فان  $q_r > q$  ذلك لان المسار الذي اتبع يكون عشوائيا، وعليه فان :

$$\Delta S = \left( \frac{q_r}{T} - \frac{q}{T} \right) > 0$$

ومن هنا نستطيع القول ان  $\Delta S = 0$  لتغير عكوس وان  $\Delta S > 0$  لتغير لاعكوس .  
وخلاصة القول فعند ادخال دالة الحالة الجديدة المسماة بالانتروبي وطالما ان الكون يمتص الحرارة من الشمس بصورة دائمة فان كمية الحرارة تكون بتزايد بالرغم من بقاء درجة الحرارة ثابتة تقريبا وان انتروبي الكون يتجه نحو النهاية العظمى وهذه الظاهرة تقودنا الى القانون الثاني للدينامية الحرارية الذي نحن بصدد دراسته .

## 2-4 القانون الثاني للدينامية الحرارية

### Second Law of Thermodynamic

عند كلامنا في الفصل السابق عن القانون الاول للدينامية الحرارية بينا ماهية العمليات التلقائية واللاتلقائية يتحول الطاقة من شكل الى اخر . فالمنظومة التي تتغير بطريقة تلقائية في اتجاه ما يكون بمقدورها انجاز شغل اذا ما سخرت ماكنة مناسبة للقيام بذلك . فانتقال الطاقة تلقائيا باتجاه واحد فقط يشكل حجر الزاوية للقانون الثاني للدينامية الحرارية . ان مبادئ التحكم في تحول الطاقة الحرارية الى شغل ميكانيكي قد درست بصورة واسعة من قبل كارنوت (S. Carnot) وذلك عام 1824 وبعد ذلك وضع تومسون (W. Thomson) الملقب بلورد كلفن (L. Kelvin) صيغة للقانون الثاني وذلك في الفترة 1845-1855 ونص هذه الصيغة

هو: « من المستحيل تصميم ماكينة تعمل بطريقة دورية وتنقل حرارة من مستودع الحرارة وتحولها الى شغل دون نقل كمية من الحرارة من جسم ساخن الى جسم بارد بنفس الوقت ».

أما كلاوسوس (Clausius) فقد وضع عام 1850 تعريفه للقانون الثاني وكما يلي:

« من المستحيل تصميم ماكينة تشتغل ذاتيا بطريقة لنقل الحرارة من جسم بارد الى جسم ساخن بدون تحويل كمية معينة من الشغل الى حرارة بنفس الوقت ».

أما بلانك (Planck) فقد عرف القانون الثاني كما يلي:

« من المستحيل بناءه ماكينة تشتغل في دورة كاملة لتنجز شغلا ميكانيكا دون تبريد مستودع الحرارة ».

يلاحظ هنا التركيز على العملية الدورية لغرض الرجوع الى الحالة الابتدائية من اجل تكرار العملية عدة مرات. كما يلاحظ التأكد على استحالة تصميم الماكينة الحرارية التي تشتغل ذاتيا بدون مساعدة خارجية. كلتزود بالحرارة، او تحويل كمية من الشغل الى حرارة... الخ. وهذا يقود الى الترابط بين الانتروبي الذي تكلمنا عنه في الفقرة السابقة والتي تمكنا من وضع القانون الثاني بالصيغة الرياضية التالية:

$$dS \geq 0$$

والتي تعبر عن القانون الثاني والذي ينص على ان كل العمليات التي تحصل في الطبيعة ترافقها زيادة في الانتروبي وان اتجاه التغيير يؤدي دائما الى زيادة الانتروبي. وهذا نص عام لكل اشكال التعبير عن القانون الثاني.

### 3-4 حساب الانتروبي للغاز المثالي

#### Calculation of The Entropy for Ideal Gas

يعتبر حساب تغيرات الانتروبي في الغاز المثالي من المسائل السهلة خاصة

عندما يكون  $\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$  المثبت بتجربة جول، حيث تهمل قوى التجاذب

والتناظر بين جزيئات الغاز فتستبعد الحاجة الى الطاقة، بالرجوع الى القانون الاول  
للدينمية الحرارية بصيغته

$$dq = du + PdV \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

ولعملية عكوسة والافادة من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية  $PV = RT$  ( جزال  
المول واحد من الغاز المثالي ) ومن تعريف السعة الحرارية في حجم ثابت  
 $dU = C_v dT$  يمكن الحصول على المعادلة:

$$dq = C_v dT + nRT \frac{dV}{V} \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

وبقسمة المعادلة (4-6) على  $T$  ينتج

$$\frac{dq}{T} = \frac{C_v dT}{T} + nR \frac{dV}{V} \quad \dots\dots\dots(4-7)$$

ومن هذه المعادلة والمعادلة (2-4) ينتج

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{C_v dT}{T} + nR \frac{dV}{V} \quad \dots\dots\dots(4-8)$$

وبتكامل المعادلة (4-8) ينتج:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + nR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \quad \dots\dots\dots(4-9)$$

وفي حالة عدم اعتماد  $C_v$  على درجة الحرارة نحصل على المعادلة:

$$\Delta S = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \dots\dots\dots(4-10)$$

أما في حالة العملية ثابتة درجة الحرارة فتصبح  $\Delta S$  كما يلي:

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1} = nR \ln \frac{P_1}{P_2} \quad \dots\dots\dots(4-11)$$

حيث ان  $(P_1/P_2) = (V_2/V_1)$  عندما تكون درجة الحرارة ثابتة. وفي حالة ثبات الحجم فان  $\Delta S$  تصبح:

$$\Delta S = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \dots\dots\dots(4-13)$$

يمكن كذلك اشتقاق علاقة  $\Delta S$  بالضغط ودرجة الحرارة كما يلي:

$$H = u + PV$$

أو

$$dH = du + Pdv + vdp$$

و

حيث ان  $d_q = du + Pdv$  ( القانون الاول للدينامية الحرارية ) عندئذ

$$d_q = dH - vdp$$

وبما ان

$$v = \frac{nRT}{P} \quad , \quad dH = nc_p dT$$

وعليه فان

$$d_q = nc_p dT - \frac{nRT}{P} dp$$

وبقسمة المعادلة على T

$$ds = \frac{d_q}{T} = \frac{nc_p dT}{T} - nR \frac{dp}{P}$$

وتكامل طرفي المعادلة وباعتبار  $c_p$  مستقلة عن درجة الحرارة:

$$\Delta S = \int_{S_1}^{S_2} dS = n \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - nR \int_{P_1}^{P_2} \frac{dT}{P}$$

$$\Delta S = nc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - nR \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \dots\dots\dots(4-14)$$

وعندما تكون درجة الحرارة ثابتة تصبح المعادلة (14-4) كما يلي :

$$\Delta S = - nR \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{.....(4-15)}$$

وعندما يكون الضغط ثابتا تصبح المعادلة (14-4) بالشكل التالي :

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{.....(4-16)}$$

مثال (1)

احسب الزيادة في الترويس لمولين من الغاز المثالي عندما يتمدد الغاز من 15 لتر الى 30 لتر.

الحل

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= (2 \text{ mol}) (8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}) \ln \frac{30}{15} \\ &= 11.5256 \text{ JK}^{-1} \end{aligned}$$

تحدث بعض التغيرات في انتظام الجزيئات عند انجماد السائل او غليانه أو تسامي المواد الصلبة ولذلك يرافق هذه العمليات تغيرات في الانتروبي. فتحت ظروف الضغط الثابت، حيث كمية الحرارة الممتصة أو المنبعثة والمسماة بالحرارة الكامنة يجب ان تساوي  $\Delta H$  أو انثالبي انتقال الطور  $\Delta H_t$  فعند درجة الحرارة التي تنتقل بلوغها المادة من طور الى آخر يكون الطوران بحالة توازن. مثال ذلك درجة غليان السائل حين يكون في توازن مع بخاره أو درجة انجماده حين يكون في حالة توازن مع طور الانجماد. وعليه عند درجة حرارة الانتقال تمتص الحرارة بطريقة عكوسة ومن هنا يمكن التعبير عن تغير الانتروبي بالشكل:

$$\Delta S = \frac{\Delta H_t}{T}$$

حيث ان T تمثل درجة حرارة الانتقال . وهناك بعض القيم المستحصلة من التجارب العملية لتغير الانتروبي مع درجة حرارة الانتقال للتبخر والانصهار ( جدول 1-4 ) .

مثال (2)

يغلي الايثانول في درجة حرارة 351.5 مُط وان حرارة تبخره 43.5 كيلو جول / مول ، احسب انتروبي التبخر لمول واحد منه في درجة غليانه المذكورة .

الحل

$$\Delta \bar{S} = \frac{\Delta \bar{H}}{T} = \frac{43500 \text{ J mol}^{-1}}{351.5 \text{ K}} = 124 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

جدول 1-4 : انتروبيات ودرجة حرارة ( بين قوسين ) لانتقال الطور عند ضغط جوي واحد

$\Delta S/\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

	Fusion ( $T_f/\text{K}$ )		Evaporation ( $T_b/\text{K}$ )	
He	6.3		19.7	(4.21)
Ar	14.2	(87.29)	71.7	(87.44)
H <sub>2</sub>	8.4	(13.95)	44.4	(20.38)
N <sub>2</sub>	11.4	(63.15)	73.16	(77.32)
O <sub>2</sub>	8.16)	(39.39)	75.6	(90.18)
Cl <sub>2</sub>	37.22	(172.15)	85.0	(239.09)
Br <sub>2</sub>	39.8	(265.90)	85.4	(331.8)
H <sub>2</sub> O	22.0	(273.15)	109.0	(373.15)
H <sub>2</sub> S	12.7	(187.61)	87.8	(212.8)
NH <sub>3</sub>	28.9	(195.39)	97.4	(239.72)
CH <sub>3</sub> OH	18.1	(175.25)	104	(337.22)
CH <sub>3</sub> COOH	40.4	(289.76)	61.9	(391.45)
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	35.3	(278.68)	87.1	(353.25)

### مثال (3)

ما هو انتروبي انصهار الايثانول اذا كانت درجة حرارة انصهاره تساوي 156 م° وانتالبي انصهاره عند درجة الانصهار تساوي 4.6 كيلو جول/مول.

الحل

$$\Delta S_f = \frac{4600 \text{ J mol}^{-1}}{156 \text{ K}} = 29.5 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

يلاحظ هنا ان انتروبي التبخر هو اعلى بكثير من انتروبي الانصهار لان الزيادة في الانتروبي عند تبخر أية مادة تكون اعلى بكثير من الانتروبي عند انصهارها بسبب ازدياد العشوائية باتجاه الحالة الغازية. ومن هنا نستطيع ان نكتب ترتيب قيم  $\Delta S$  لحالات المادة الثلاث كما يلي:

$$\Delta S_{\text{vap}} > \Delta S_{\text{liq}} > \Delta S_{\text{solid}}$$

اما تغير الانتروبي عندما تسخن المنظومة الى اية درجة مطلوبة اذا كانت في طور معين وكان الضغط ثابتا فان الحرارة المتصدة في كل خطوة متلاشية  $d_{\text{qrev}}$  تساوي  $dH$  وحيث ان  $dH = c_p dT$  (تعريف السعة الحرارية تحت ضغط ثابت)، فعليه يمكن كتابة تغير الانتروبي المتلاشي بدلالة  $c_p dT$  بدلا من  $ds = (dH/T)$  كما يلي:

$$ds = \frac{c_p dT}{T} \quad \dots\dots\dots(4-17)$$

وهناك حالتان ينبغي مراعاتهما في حساب تغير الانتروبي وهما:

أولا: اذا كانت  $c_p$  لا تعتمد على درجة الحرارة ففي هذه الحالة تكامل المعادلة (4-17) كما يلي:

$$\int_1^2 ds = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p dT}{T} \quad \dots\dots\dots(4-18)$$

$$S_2 - S_1 = \Delta S = C_p (\ln T_2 - \ln T_1)$$



$$= C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (4-19)$$

أو يمكن كتابتها

$$\Delta S = 2.303 C_p \log \frac{T_2}{T_1} \quad \dots\dots\dots(4-20)$$

وهي نفس المعادلة (4-16) التي تم اشتقاقها في هذه الفقرة  
ثانياً: إذا كانت  $C_p$  تعتمد على درجة الحرارة فيمكن استخدام المعادلة الوصفية التالية:

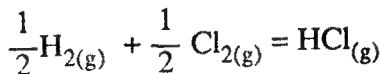
$$C_p = a + bT + cT^2$$

والتعويض عن  $C_p$  في المعادلة (4-18) والتبسيط تم اجراء التكامل على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT = \int_{T_1}^{T_2} \frac{a + bT + cT^2}{T} dT \\ &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{a}{T} dT + \int_{T_1}^{T_2} b dT + \int_{T_1}^{T_2} cT dT \\ &= a \ln \frac{T_2}{T_1} + b (T_2 - T_1) + \frac{c}{2} (T_2^2 - T_1^2) \end{aligned}$$

#### مثال 4

اعطيت السعات الحرارية تحت ضغط ثابت لمواد التفاعل التالي:



وكما يلي

$$H_{2(g)} C_p = 6.82 \text{ cal mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$$

$$Cl_{2(g)} C_p = 7.71 \text{ cal mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$$

$$HCl_{(g)} C_p = 6.81 \text{ cal mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$$

احسب  $\Delta S$  للتفاعل عندما ترتفع درجة الحرارة من 200°م الى 500°م

الحل

لحساب  $\Delta C_p$  للتفاعلات والنواتج نلجأ للمعادلة التالية:

$$\Delta C_p = \sum C_{p, \text{prod}} - \sum C_{p, \text{react}}$$

ونعوض فيها قيم السعات الحرارية بضغط ثابت والمعطاة في المعادلة:

$$\Delta C_p = 6.81 - \frac{1}{2} (6.82) - \frac{1}{2} (7.71) = -0.46 \text{ cal mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$$

وبتطبيق المعادلة التالية:

$$\Delta S = 2.303 \Delta C_p \log \frac{T_2}{T_1}$$

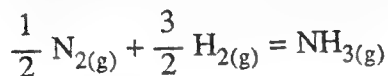
بعد تحويل درجات الحرارة المئوية الى المقياس المطلق والتعويض:

$$\Delta S = 2.303 (-0.46) \log \frac{773.15}{473.15}$$

$$\Delta S = -0.2259 \text{ cal deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

مثال 5

جد تغير الانتروبي للتفاعل التالي ما بين درجة 298°م ودرجة 1000°م



مستفيدا من المعلومات التالية:

$$N_{2(g)} C_p = 6.76 + 0.606 \times 10^{-3} T + 1.3 \times 10^{-7} T^2 \text{ cal mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$$

$$H_{2(g)} C_p = 6.62 + 0.81 \times 10^{-3} T \text{ cal mol}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

الحل

باستعمال العلاقة التالية

$$\Delta C_{p,\text{total}} = \sum C_{p,\text{prd}} - \sum C_{p,\text{rec}}$$

والتعويض في قيم  $C_p$

$$\begin{aligned} \Delta C_{p,\text{total}} &= [6.186 + 7.887 \times 10^{-3} T - 7.28 \times 10^{-7} T^2] \\ &\quad - \left[ \frac{1}{2} (6.76 + 0.606 \times 10^{-3} T + 1.3 \times 10^{-7} T^2) \right] \\ &\quad + \frac{3}{2} (6.62 + 0.81 \times 10^{-3} T) \end{aligned}$$

نحصل على

$$\Delta C_p = -7.12 + 6.364 \times 10^{-3} T - 7.93 \times 10^{-7} T^2$$

باستعمال المعادلة

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p dT}{T}$$

والتعويض عن  $C_p$  كدالة لدرجة الحرارة كما وردت اعلاه والتبسيط

$$\Delta S = \int_{298}^{1000} -\frac{7.12}{T} dT + \int_{298}^{1000} 6.36 \times 10^{-3} dT - \int_{298}^{1000} 7.93 \times 10^{-7} T dT$$

ثم اجراء التكامل

$$\Delta s = (-7.12)(2.303 \log \frac{1000}{298}) + 6.364 \times 10^{-3}(1000 - 298)$$

$$- \frac{7.93 \times 10^{-3}}{2} [(1000)^2 - (298)^2] = -361.9 \text{ cal deg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

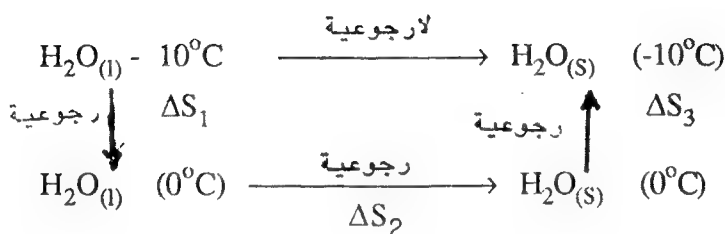
#### 4-4 تغيرات الانتروبي للعمليات الارجوعية

##### Entropy changes for irreversible processes

تمثل هذه الفقرة توضيح عملي لتغيرات الانتروبي في عملية لارجوعية من سلسلة من خطوات رجوعية اذ ان من المعلوم لدينا ان S لا تعتمد على المسار الذي تسلكه عملية التغير ولذلك يجب ان نفتش عن طريق اخر يبدأ من نفس الحالة الابتدائية وينتهي عند الحالة النهائية المقصودة.

لنأخذ مثلاً تبريد سائل الى درجة حرارة اوطأ من درجة انجماده الطبيعية وليكن لدينا مول واحد من الماء مبرد بصورة فائقة في ثلاجة، وبعد يوم تحول هذه الكمية من الماء الى جليد في نفس درجة حرارة التبريد الفائق التي وصلت اليها والمطلوب حساب انتروبي مثل هذا التغير يفترض ان تكون هذه العملية لارجوعية اذ ان من المستحيل ان نذيب الجليد الذي هو في درجة -10م° لتحوله الى سائل في -10م°. ولحساب التغير في S لمثل هذه العملية نجزئها الى عدة خطوات رجوعية وهي كما يلي:

- 1 — تسخين الماء السائل -10م° الى 0م°.
- 2 — نجمد الماء السائل الذي في درجة 0م° الى جليد في درجة الصفر المئوي.
- 3 — نحول الجليد في درجة الصفر المئوي الى جليد في درجة -10م° ويمكن تلخيص العملية بالشكل التالي:



يمكن استعمال المعادلات التالية بالنسبة لكل خطوة رجوعية

$$\Delta \bar{S}_1 = \int_{263}^{273} \bar{C}_{\text{liq}} \frac{dT}{T}$$

$$\Delta \bar{S}_2 = \frac{q_{\text{rev}}}{T}$$

$$\Delta \bar{S}_3 = \int_{273}^{263} \bar{C}_{\text{ice}} \frac{dT}{T}$$

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3$$

$$\bar{C}_{p(\text{water})} = 75.3 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$C_{p(\text{ice})} = 36.9 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f(273) = 5950 \text{ J mol}^{-1}$$

$$\Delta S_{\text{total}} = \int_{263}^{273} C_{p(l)} \frac{dT}{T} + \frac{\Delta H_f}{T_f} + \int_{273}^{263} C_{p(\text{ice})} \frac{dT}{T}$$

$$\Delta S_{\text{total}} = 75.3 \ln \frac{273}{263} + \frac{5950}{273} + 36.9 \ln \frac{263}{273}$$

تمثل هذه القيمة الانخفاض في انتروبي الماء المبرد الى جليد في درجة 263° مطثما يدل على زيادة الانتظام لجزيئات الماء في هذه العملية. ولايجاد انتروبي المحيط نستطيع ان نفترض ان درجة حرارة المحيط تبقى ثابتة لاتتغير (263° مط) ونحسب انتالبي الانجماد ( $\Delta H_{fus}$ ) في درجة الحرارة 263° مط من معادلة كيرجهوف (Kirchhoff's equation) حيث الضغط لايزال ثابتا:

$$\frac{d \Delta H_f}{dT} = \Delta C_p = C_{p(l)} - C_{p(ice)} = 38 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_f(273 \text{ K}) - \Delta H_f(263 \text{ K}) &= 38.4 (273 - 263) \\ &= 384 \text{ J mol}^{-1} \end{aligned}$$

وبطرحها من انتالبي الانجماد وفي الصفر المتوي كإيلي:

$$\Delta H_f(263) = 5950 - 384 = 5566 \text{ J mol}^{-1}$$

ومنها يمكن حساب  $\Delta S$  كإيلي:

$$\Delta S_f = \frac{5566}{263} = 21.2 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

وعليه يكون المجموع الجبري لتغيرات انتروبي المنظومة والمحيط:

$$21.2 - 20.4 = 0.8 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

ومن الجدير بالذكر ان المنظومة والمحيط يشكلان ما يطلق عليه بالكون، وعليه يلاحظ هنا ان انتروبي الكون (Universe) قد ازداد خلال الانجماد المارجوعي لانساء المبرد بصورة فائقة وهذا برهان على تعريف من تعاريف القانون الثاني للدينمية الحرارية الذي ينص على ان انتروبي الكون يزداد باستمرار نتيجة للعمليات المراجعة.

## 5-4 انتروبي مزج الغازات المثالية

### Entropy of Mixing of Ideal Gas

إذا وضعنا غازين مثاليين كالأوكسجين والنيتروجين في دورقين منفصلين A و B عند ضغط P ودرجة حرارة T تم فتحنا الصنبور بينهما اخذ الغاز يمتزجان حتى أصبح الطور الغازي متجانسا. وبما ان الغازين مثاليان فلا تجاذب بينهما ولا يخلص اى تغير في الطاقة الداخلية او الانتالبي عند المزج اذ ان التلقائية هي زيادة الانتروبي نتيجة امتزاجهما وهي ذات القوة التي تنتج عند تمدد غاز مثالي. ولنفرض ان عدد مولات الغاز A هي  $n_A$  وعدد مولات الغاز B هي  $n_B$  وبقي كل من الضغط ودرجة الحرارة ثابتين فعليه يكون تغير الانتروبي  $S$  لكل منهما هو نفس تغير الانتروبي الحاصل من تمدد الغاز في درجة حرارة ثابتة من ضغطه قبل المزج الى ضغطه الجزئي بعد المزج الذي يساوي الضغط الكلي افتراضا خاصا اى ان  $P'_A = P'_B = P$  وعليه يمكن التعبير عن التغير في انتروبي كل منهما كمايلي:

$$\Delta S_A = n_A R \ln \frac{P}{P_A}$$

$$\Delta S_B = - n_B R \ln \frac{P}{P_B}$$

وفي حالة المزيج يكون  $\Delta S_{mix}$  ( انتروبي المزج )

$$\Delta S_{mix} = n_A R \ln \frac{P}{P_A} + n_B R \ln \frac{P}{P_B} \quad \dots\dots\dots(4-21)$$

وبالافادة من قانون دالتون للضغوط الجزئية التي تحدد العلاقة بين الضغط الكلي والضغوط الجزئية:

$$P_B = X_B P \quad , \quad P_A = X_A P$$

حيث ان  $X_B$  و  $X_A$  الكسران الموليان للغازين A و B على التوالي وبتعويض هاتين العلاقتين في المعادلة (4-21) على:

$$\Delta S_{\text{mix}} = n_A R \ln \frac{1}{X_A} + n_B R \ln \frac{1}{X_B}$$

أو

$$\Delta S_{\text{mix}} = - n_A R \ln X_A - n_B R \ln X_B \quad \dots\dots\dots(4-22)$$

فاذا فرضنا ان  $n_A + n_B = 1$  فان تغير الإنتروبي يكون لكمية مولارية وتصبح المعادلة (22-4) بالشكل التالي :

$$\Delta S_{\text{mix}} = - R (X_A \ln X_A + X_B \ln X_B) \quad \dots\dots\dots(4-23)$$

ويكون إنتروبي المزج موجبا لان  $X_A < 1$  ,  $X_B < 1$  وهذا دليل على تلقائية انتشار الغازين المثاليين فيما بينهما، يمكن استعمال المعادلة (23-4) لتطبق على مزج ما مجموعة مول واحد من مكونات عددها  $i$  لتكوين مزيج مثالي

$$\Delta \bar{S}_{\text{mix}} = - R \sum_i X_i \ln X_i \quad \dots\dots\dots(4-24)$$

ويمكن استعمال الحجم بدلا من الضغوط للوصول الى نفس النتيجة المذكورة.

#### 6-4 معايير التوازن الكيميائي

##### Criteria of Chemical equilibrium

لقد حاول بيرثيلوت Berthelot عام 1879 الوصول الى معيار دينامي حراري حيث وضع استنتاجه عن التفاعلات الباعثة للحرارة بانها تفاعلات تلقائية. الا ان هذا الاستنتاج اصبح خاطئا لان كثير من التفاعلات التلقائية تمتص الحرارة. على كل حال ان القانون الثاني يعرف العمليات التلقائية بالعمليات التي يؤدي حدوثها الى زيادة الإنتروبي وهذا معيار مهم لمعرفة ماهية العمليات اذا كانت تلقائية او لا. وهناك تقييدات يمكن ان تفرض على المنظومة منها مثلا طاقتها الداخلية عندما تكون معزولة يجب ان تكون  $dU = 0$  وبما ان  $dU = dq - Pdv$  و  $dq = 0$



للمنظومة المعزولة ايضاً يجب ان يكون  $dv = 0$ . نجد في هذه الحالة ان التقييدات الضرورية هنا على المنظومة المعزولة ان تبقى الطاقة الداخلية  $U$  والحجم  $v$  غير مقيدين، وحالما نرفع هذه التقييدات تحصل العمليات التلقائية كالتفاعلات مثلاً في منظومة معزولة وتكون عندئذ  $\Delta S > 0$ . وقد سبقت الإشارة الى ان العمليات التلقائية هي عمليات لارجوعية ( المنظومة والمستودع )، فعليه يجب ان يكون  $Tds$  اكبر من  $dq$  لذلك:

$$dq - Tds < 0 \quad \text{.....(4-25)}$$

يمكن الافادة من هذه اللامتساوية في ملاحظة تقييدات ثبات الانتروبي والحجم فعند التعويض عن  $dq$  بما يساويها في القانون الاول للدينامية الحرارية، حيث الشغل من نوع ضغط حجم:

$$dq = du + P dv \quad \text{.....(4-26)}$$

نحصل على اللامتساوية:

$$(du + Pdv - Tds) < 0 \quad \text{.....(4-27)}$$

وحسب التقييدات المشار اليها توا يحذف الحدان  $Tds$  و  $Pdv$  فتؤول اللامتساوية (27-4) الى:

$$(du)_{v,s} < 0 \quad \text{.....(4-28)}$$

وهذا يعني انخفاض الطاقة الداخلة باتجاه النهاية الصغرى ويدلل هذا على ان الحالة المستقرة هي التي تمتلك اوطأ طاقة ويمكن من اللامتساوية (27-4) الرجوع الى العمليات اللارجوعية كما بدأنا عند تثبيت كل من الحجم والطاقة الداخلية الى ان

$$ds > 0 \quad \text{.....(4-29)}$$

اما المنظومة المغلقة، حيث تبقى المادة محصورة داخل جدرانها الصلدة، حيث تسمح

للطاقة الداخلية بالانتقال الى المحيط ذي درجة الحرارة الثابتة والتي ستحدث تغيراً في انتروبي الكون « المنظومة + المحيط » في عمليات لارجوعية وهذه الحالة تفرق تقييدات وثبات كل من الحجم ودرجة الحرارة فيكون فيها الشغل صفراً اي ان  $Pdv = 0$  وتقلص اللامتساوية (27-4) الى

$$(du - T ds)_v < 0 \quad \text{.....(4-30)}$$

وهنا تجدر الاشارة الى لمحة جديدة وهي ان هيلمهولتز قد قدم دالة دينمية حرارية تعتمد على حالة المنظومة الابتدائية والنهائية عندما يكون كل من درجة الحرارة والحجم ثابتين وتعرف بطاقة هيلمهولتز الحرة (Helmholtz free energy) ويرمز لها بالحرف  $A$  وتعرف بالصيغة الرياضية التالية  $A = (U - TS)$  وبما انه من الممكن كتابة اللامتساوية (30-4) بالشكل  $d(U - TS)_{T,v} < 0$  فعليه يمكن التعبير عن هذه اللامتساوية بادخال طاقة هيلمهولتز الحرة  $A$  وتصبح اللامتساوية (30-4) كما يلي:

$$(dA)_{T,v} < 0 \quad \text{.....(4-31)}$$

وهذا يعني ان طاقة هيلمهولتز الحرة تنخفض في العمليات اللارجوعية التي تتم تحت درجة وحجم ثابتين. اما في حالة انتقال الحرارة  $(dq)_p$  من المنظومة الى محيطها، حيث يكون كل من الضغط ودرجة الحرارة ثابتين فيمكن مساواة  $(dq)_p$  بالمقدار  $dH$  وعليه يمكن كتابة اللامتساوية (27-4) بالشكل:

$$d(U + Pv - TS)_{T,p} < 0 \quad \text{.....(4-32)}$$

طالما ان  $H = U + PV$  وهنا يمكن ادخال دالة ديناميكية حرارية تعتمد على حالة المنظومة الابتدائية والنهائية وتحدث تغيراتها تحت ضغط ودرجة حرارة ثابتين وتعرف بطاقة كبس الحرة Gibbs free energy ويرمز لها بـ  $G$  وتعرف بالصيغة  $G = H - TS$  أو  $G = U + Pv - TS$  من هنا يمكن التعبير عن اللامتساوية (32-4) بالشكل:

$$(dG)_{T,p} < 0 \quad \text{.....(4-33)}$$

وتعني هذه اللامتساوية ان طاقة كبس الحرة للمنظومة تنخفض عند ثبات كل من درجة الحرارة والضغط. اما اذا تمت العمليات بشكل رجوعي، حيث  $\Delta S = 0$  فان جميع اللامتساويات تستبدل علاماتها بعلامة المساواة لتعبر عن حالة التوازن الدينامي الحراري. ويعبر عن معيار التوازن الدينامي الحراري بالعلامة ( $>$ ) التي تعني اكبر أو العلامة ( $<$ ) التي تعني اصغر وكلاهما يعبر عن العمليات اللارجوعية وعلامة المساواة ( $=$ ) التي تعبر عن العمليات الرجوعية.

ان معايير التوازن للعمليات الرجوعية والارجوعية مدرجة كمايلي:

$$(dS)_{u,v} \geq 0$$

$$(dU)_{v,s} \leq 0$$

$$(dA)_{T,v} \leq 0$$

$$(dG)_{T,p} \leq 0$$

#### 7-4 طاقة كبس الحرة كمعيار للتوازن في درجة حرارة وضغط ثابتين

**Gibbs free energy at constant temperature and pressure is a criteria for equilibrium**

سنناقش هنا اهمية الطاقة الحرة لكبس باعتبارها معيارا لتلقائية التفاعلات الكيميائية، ويمكن كتابة التعبير الرياضي لدالة كبس بالشكل التالي:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \dots\dots\dots(4-34)$$

يمكن ان يحدث التغير الفيزيائي او التفاعل الكيميائي تلقائياً فقط عندما تكون طاقة كبس الحرة اقل قيمة في النهاية من قيمتها في البداية، وهذا يعني انه في التغيرات التلقائية فان الطاقة المستخدمة في التفاعل تتناقص لامكانية حصول الشغل دائما من تناقص هذه الطاقة كمبدأ وعليه تكون العمليات ممكنة الحدوث عند ثبات

كل من درجة الحرارة والضغط اذا كانت  $\Delta G$  سالبة وغير ممكنة اذا كانت موجبة وتدعى العمليات الممكنة الحدوث تلقائياً بالعمليات الطبيعية وتكون  $(\Delta G)_{T,P} < 0$  ، والعمليات غير ممكنة الحدوث تلقائياً غير الطبيعية وتكون  $(\Delta G)_{T,P} > 0$  . وأما في العمليات العكوسة او في حالة التوازن الكيميائي فتكون  $(\Delta G)_{T,P} = 0$  . يمثل المعيار الاخير تعميماً لمبدأ الشغل الافتراضي ليشمل كل اشكال الطاقة. وينص الشغل الافتراضي Virtual work لمنظومة ميكانيكية كي تكون في حالة توازن ان الشغل المنجز في أية ازاحة طفيفة يجب ان يكون صفراً. وتعتمد قيمة  $\Delta G$  على قيم كل من  $\Delta H$  و  $T \Delta S$  واشارتهما فتكون  $\Delta G$  سالبة او العملية تلقائية او طبيعية في الاحوال التالية:

1 — عندما تكون  $\Delta H$  سالبة و  $\Delta S$  موجبة بغض النظر عن القيمة.

2 — عندما تكون  $\Delta H$  موجبة و  $\Delta S$  موجبة يجب ان تكون  $\Delta H > T \Delta S$  قيمة.

3 — عندما تكون كل من  $\Delta H$  و  $\Delta S$  سالبتين بحيث ان  $\Delta h < T \Delta S$  قيمة.

وتكون اشارة  $\Delta G$  موجبة او العملية غير تلقائية او غير طبيعية في الظروف التالية.

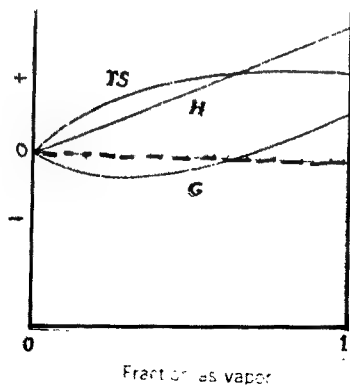
1 — عندما تكون اشارة كل من  $\Delta H$  و  $\Delta S$  موجبتين بحيث ان  $\Delta H > T \Delta S$  قيمة.

2 — عندما تكون اشارة كل من  $\Delta H$  و  $\Delta S$  سالبتين بحيث ان  $\Delta H < T \Delta S$  قيمة.

3 — عندما تكون اشارة  $\Delta H$  سالبة و  $\Delta S$  موجبة الا ان  $\Delta H < T \Delta S$  قيمة.

يلاحظ من هذه الظروف بأن الشرط المشترك هو ان لدرجة الحرارة دور كبير في تحديد قيمة و اشارة  $\Delta G$  فمن الممكن تحويل بعض التفاعلات غير التلقائية الى اخرى تلقائية وذلك بزيادة درجة الحرارة، وبهذا فاننا نزيد من مساهمة المعامل  $T \Delta S$  فاذا كانت اشارة  $\Delta H$  موجبة فان التفاعل سيصبح تلقائياً عند زيادة درجة

الحرارة، بحيث تصبح قيمة المعامل  $T\Delta S$  اكبر من  $\Delta H$  . ويمكن حساب درجة الحرارة التي ستجعل تفاعلاً ما تلقائياً إذا ما علمنا مسبقاً قيمة  $\Delta S$  وقيمة  $\Delta H$  لهذا التفاعل. لو اخذنا منظومة مكونة من مادة صلبة موضوعة في حيز مغلق فان ميل المنظومة للحصول على اوطأ انثالبي يقود الى تكثيف طور البخار الى سائل في حين ان ميل المنظومة للوصول الى اعلى انتروبي يؤدي الى تبخر المادة ويمكن توضيح هذه العلاقة بالرسم التالي:



شكل (1-4): علاقة الدوال الدينامية الحرارية لمنظومة بلورة — بخار بثبت درجة الحرارة والضغط.

#### 8-4 المعادلات الأساس للمنظومات المغلقة

##### Fundamental equations for closed systems

يطلق على المنظومة بأنها مغلقة عندما تكون تكويناتها ثابتة لا تتغير. فعندما تحصل فيها عمليات عكوسة وبغياب أى نوع من الشغل عدا الشغل نوع ضغط — حجم فإنه يمكن استبدال  $dq$  بالمقدار  $Tds$  و  $dw$  بالمقدار  $-PdV$  فتتكون لدينا المعادلة:

$$dU = Tds - PdV \quad \dots\dots\dots(4-35)$$

حيث ادخل الانتروبي في الصيغة الرياضية للقانون الاول للدينامية الحرارية. تطلق المعادلة (35-4) على التغيرات الرجوعية، ومن المعلوم لدينا ان تفاضل مضبوط لايعتمد على المسار لذلك يكون  $dU$  الرجوعي مساو الى  $dU$  اللارجوعي اي ان  $dU_{rev} = dU_{irrev}$  وعليه يمكن تطبيق المعادلة (35-4) على العمليات الرجوعية والارجوعية. ويطلق على هذه المعادلة بالمعادلة الاساس وهنالك معادلات اساس اخرى تعبر عن علاقات كل من  $dH$  و  $dA$  و  $dG$  بالانتروبي وهي كما يلي:

$$dH = TdS + vdP \quad \dots\dots\dots(4-36)$$

$$dA = -sdT - PdV \quad \dots\dots\dots(4-37)$$

$$dG = -sdT + vdP \quad \dots\dots\dots(4-38)$$

ونترك للمطلبة محاولة اشتقاقها من المعادلة (35-4) وتعريف كل من  $H$  و  $A$  و  $G$ .

يلاحظ من المعادلات (38-35) تغير  $dU$  مع كل من  $dS$  و  $dV$  وتغير  $dH$  مع  $dS$  و  $dP$  وتغير  $dG$  مع  $dT$  و  $dP$  وعليه يمكننا ان نكتب كل منها بصيغة دوال كالآتي:

$U_{(s,v)}$  و  $H_{(s,P)}$  و  $A_{(T,v)}$  و  $G_{(T,P)}$  ويمكن الان ان نكتبها بالشكل الرياضي التالي:

$$dU = \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v ds + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s dv \quad \dots\dots\dots(4-39)$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial s}\right)_P ds + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_s dP \quad \dots\dots\dots(4-40)$$

$$dA = \left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial A}{\partial v}\right)_T dv \quad \dots\dots\dots(4-40)$$

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T dP \quad \dots\dots\dots(4-42)$$

وتفيد هذه المعادلات في التعبير عن كل من درجة الحرارة المطلقة والضغط والحجم بدلالات مقادير دينمية حرارية وكذلك الانتروبي. فبالمقارنة ما بين المعادلات (35-38) والمعادلات (39-42) نحصل على المشتقات التالية:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v = T \quad \dots\dots\dots(4-43)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s = - P \quad \dots\dots\dots(4-44)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial s}\right)_p = T \quad \dots\dots\dots(4-45)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_s = V \quad \dots\dots\dots(4-46)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_v = - S \quad \dots\dots\dots(4-47)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial v}\right)_T = - P \quad \dots\dots\dots(4-48)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = - S \quad \dots\dots\dots(4-49)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = V \quad \dots\dots\dots(4-50)$$

يمكن استخدام المعادلات (43-50) للوصول الى علاقات متبادلة فيمساواة المعادلات (43, 44, 46, 47) بالمعادلات (45 و 48 و 49 و 50) نحصل على المتساويات التالية:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial s}\right)_v = \left(\frac{\partial H}{\partial s}\right)_p \quad \dots\dots\dots(4-51)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_s = \left(\frac{\partial A}{\partial v}\right)_T \quad \dots\dots\dots(4-52)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_s = \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T \quad \dots\dots\dots(4-53)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p \quad \dots\dots\dots(4-54)$$

يمكن توضيح الافادة من العلاقات (43-50) بدراسة اعتماد طاقة كبس الحرة على كل من درجة الحرارة والضغط وذلك بالتركيز على المعادلتين (4-49) و (4-50) كما في الفقرتين التاليتين.

#### 9-4 تأثير درجة الحرارة على طاقة كبس الحرة بثبات الضغط

#### Influence of temperature on Gibbs free energy at constant pressure

تعني المعادلتين (4-49) و (4-50) ان قيمة  $s$  تكون دائماً موجبة وان  $G$  ينبغي ان تتناقص قيمتها كلما ازدادت درجة الحرارة عندما يكون الضغط ثابتاً. ويكون التناقص كثيراً عندما يكون انتروبي الحالة كبيراً وكدليل على ذلك ان  $\Delta G$  تساوي صفراً عند درجة غليان السائل لان تناقص  $G$  في البخار اكثر بكثير من تناقصها في الحالة السائلة في نفس درجة الغليان واذا زادت درجة الحرارة عند درجة الغليان تأخذ  $\Delta G$  القيمة السالبة لان العملية ستكون تلقائية. ويمكن مساواة معامل درجة الحرارة لطاقة كبس الحرة ذلك باعتبار  $G = H - TS$  ومن المعادلة (4-49).



$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right) = -S = \frac{G - H}{T} \quad \text{.....(4-55)}$$

وهذه المعادلة صورة من معادلة كبس — هيلمهولتز ويمكن ان تكتب بطريقة اخرى وكمايلي.

باجراء التفاضل على (G/T) بالنسبة الى درجة الحرارة بثبوت الضغط:

$$\left[\frac{\partial(G/T)}{\partial T}\right]_p = -\frac{G}{T^2} + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p \quad \text{.....(4-56)}$$

وبالتعويض عن  $(\partial G / \partial T)_p$  بالحد  $(G-H/T)$  من المعادلة (55-4)

نحصل على

$$\left[\frac{\partial(G/T)}{\partial T}\right]_p = -\frac{H}{T^2} \quad \text{.....(4-57)}$$

وبما ان  $[\partial(1/T)/\partial T] = -(1/T^2)$  وبقسمة المعادلة (57-4) عليه

نحصل على المعادلة:

$$\left[\frac{\partial(G/T)}{\partial(1/T)}\right]_p = \left[\frac{\partial(G/T)}{\partial T}\right]_p \left[\frac{\partial T}{\partial(1/T)}\right] = H \quad \text{.....(4-58)}$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة بدلالة  $\Delta G$  ,  $\Delta H$  وذلك بكتابة المعادلة

(55-4) بالشكل:

$$\left[\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right]_p = -\Delta S = \frac{\Delta G - \Delta H}{T} \quad \text{.....(4-59)}$$

وباجراء التفاضل على  $(\Delta G / T)$  بالنسبة الى درجة الحرارة للحصول على:

$$\left[ \frac{\partial (\Delta G/T)}{\partial (1/T)} \right]_p = \Delta H \quad \text{.....(4-60)}$$

مثال

إذا كان انثاليبي تفاعل اجرى عند درجة الحرارة  $298^\circ$  مط تساوي — 2000 كيلو جول / مول وفي نفس درجة الحرارة كانت  $\Delta G_{298}^\circ = -3200$  كيلو جول / مول. جند قيمة  $\Delta G^\circ$  عند درجة حرارة  $313^\circ$  مط. وبين فيما اذا يصبح التفاعل تلقائيا في هذه الدرجة.

الحل

بما ان درجتي الحرارة متقاربا فيمكن كتابة المعادلة (4-60) بالصورة

التقريبية:

$$\left[ \frac{\partial (\Delta G/T)}{\partial T} \right]_p = \frac{\Delta G(T_2)/T_2 - \Delta G(T_1)/T_1}{T_2 - T_1} = - \frac{\Delta H(T_1)}{T_1^2}$$

ومنها

$$\Delta G(T_2) = \frac{T_2}{T_1} \Delta G(T_1) - \frac{T_2(T_2 - T_1) \Delta H(T_1)}{T_1^2}$$

$$\Delta G(313) = \frac{313}{298} (-3200) - \frac{313 (313 - 298)(-3000)}{298^2}$$

$$\Delta G(313) = 1.05 (-3200 \text{ KJ mol}^{-1}) - 0.053 (-3000 \text{ KJ mol}^{-1})$$

$$\Delta G(313) = -3360 + 158.6 = -3201.4 \text{ KJ mol}^{-1}$$

ومن هنا يتبين بأن التفاعل تلقائي، حيث تكون  $\Delta G$  اكثر سالبة.

#### 10-4 تأثير الضغط على طاقة كبس الحرارة

#### Influence of pressure on Gibbs free energy

تبين المعادلة (4-50) انه بزيادة الضغط تزداد طاقة كبس الحرارة، حيث يكون الحجم موجبا دائماً. وان هذه العلاقة تعتمد على حالة مادة المنظومة اذا كانت صلبة أم سائلة أم غازية. ففي الحالتين الصلبة والسائلة يكون تأثير الضغط مهملاً. فباجراء التكامل على المعادلة (4-50) من الضغط الابتدائي  $P_i$  الى الضغط النهائي  $P_f$  فان الصيغة النهائية للمعادلة وبصيغة  $G$  تكون:

$$G(P_f) = G(P_i) + \int_{P_i}^{P_f} v(P) dP \quad \dots\dots\dots(4-61)$$

وحيث ان الحجم لايعتمد على الضغط او اعتماده ضعيف جداً في الحالتين الصلبة والسائلة فان  $V$  تكون خارج التكامل وتصبح المعادلة (4-61):

$$G(P_f) = G(P_i) + (P_f - P_i) \Delta v \quad \dots\dots\dots(4-62)$$

ويهمل الحد الثاني  $(P_f - P_i) \Delta v$  من المعادلة الاخيرة وتصبح عندئذ:

$$G(P_f) = G(P_i)$$

وهذا يعني ان  $\Delta G$  تكون مستقلة عن الضغط في الحالتين الصلبة والسائلة. وعلى كل حال اذا كانت الضغوط عالية جداً فان تأثيرها على طاقة كبس الحرارة لايمكن تجاهله.

مثال

اذا كانت  $\Delta G$  لانتقال ملح من هيكل بلورى معين الى اخر  $J - 900$  في درجة حرارة  $25^\circ C$  وحدث تغير في الحجم مقداره  $3.0 \text{ سم}^3$  فما مقدار الضغط

الذي يجعل من الملح في هيكله البلوري الاول، الشكل المستقر في نفس درجة الحرارة.

الحل

$$G_2 - G_1 = \Delta V(P_2 - P_1)$$

$$-900 - 0 = 3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 (1.0133 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2} - P_1)$$

$$\therefore P_1 = 3.001 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$$

مثال

يتمدد مول واحد من غاز مثالي في 25°م رجوعيا وفي درجة حرارة ثابتة من 20 جو الى 1 جو تجاه ضغط يُخفّض تدريجياً:

(أ) احسب الكميات الدينامية الحرارية  $\Delta U$  و  $\Delta H$  و  $\Delta G$  و  $\Delta A$  و  $\Delta S$ .

(ب) اذا تمدد مول واحد من الغاز الى وعاء مفرغ من الهواء في نفس الظروف احسب نفس الكميات المذكورة في الفرع (أ).

الحل

(أ) باستعمال معادلة الحالة العامة للغازات المثالية فان الحجم يزداد من 1.222 لتر الى 24.436. ولعملية ايزوثرمية رجوعية فان الشغل الاعظم يساوي:

$$\begin{aligned} W_{\max} &= -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= -(1.987) (298.15) (2.303) \log \frac{24.436}{1.222} \\ &= -1775 \text{ cal mol}^{-1} \end{aligned}$$

وحيث ان التغير في طاقة هيلمهولتز الحرة يساوي الشغل الاقصى فعليه  
تكون قيمة  $\Delta A$  نفس القيمة اعلاه أي ان

$$\Delta A = W_{\max} = -1775 \text{ cal mol}^{-1}$$

ولما كانت الطاقة الداخلية للغاز المثالي لا تتأثر بتغير الحجم فان

$$\Delta u = 0$$

وكذلك تغير الانثالبي

$$\Delta H = \Delta u + \Delta(Pv) = 0 + 0 = 0$$

ان  $(PV) = 0$  لان حاصل ضرب  $PV$  يبقى ثابتا لغاز

مثالي في درجة حرارة ثابتة، اما التغير في طاقة كبس الحرة  $G$   
فيكون:

$$\Delta G = n RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

وبتعويض القيم المعروفة:

$$\Delta G = (1.987) (298.15)(2.303) \log \frac{1}{20}$$

تصبح قيمة  $G$

$$\Delta G = -1775 \text{ cal mol}^{-1}$$

التي هي نفس قيمة الشغل الاقصى الرجوعي. اما كمية الحرارة  
فتحسب كمايلي:

$$q = \Delta u - W = -(-1775) = 1775 \text{ cal mol}^{-1}$$

اما قيمة  $\Delta S$  فتحسب وفق الصيغة التالية:

$$\Delta S = \frac{q_{\text{rev}}}{T} = \frac{1775.06}{298.15} = 5.954 \text{ cal mol}^{-1}$$

(ب) ان هذه لعملية في درجة حرارة ثابتة وليست رجوعية وهذا يعنى ان الشغل يساوي صفرا لان المنظومة مغلقة. اما التغير في الطاقة الداخلية فانه يساوي صفرا، لذلك فان  $q$  هي الاخرى تساوي صفرا أى ان:

$$q = \Delta u - W = 0 + 0 = 0$$

أما قيم  $\Delta \bar{H} \cdot \Delta \bar{G} \cdot \Delta \bar{A} \cdot \Delta \bar{S}$  فهي نفسها كما في المثال ( أ ) لان الحالة الاولى والحالة النهائية هي نفسها في الفرعين .

#### 11-4 اعتماد الانتروبي على متغيرات المجموعة وعلاقات ماكسويل

##### Maxwell Relationship

الانتروبي هو دالة حالة المنظومة، لذلك فان قيمته ستعتمد على حد كبير على المتغيرات الثلاثة وهي درجة الحرارة والحجم والضغط. بصورة عامة نختار درجة الحرارة لتكون المتغير المستقل وسنتناول هنا بعض العلاقات التي ستوضح هذه الحقيقة. كما بينا سابقا اذا كانت الدالة  $U$  تعتمد على المتغيرين  $x$  و  $y$  فان من الممكن كتابة هذه الدالة بالشكل التالي:

$$U = f(x, y)$$

ولتفاضل مضبوط  $dU$  يمكن كتابة المعادلة التالية:

$$dU = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_x dy \quad \dots\dots\dots (4-64)$$

وباستخدام العلاقة التالية:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_y \right] = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_x \right]_y \quad \dots\dots\dots (4-65)$$

يمكن الوصول الى ما يسمى بعلاقات ماكسويل ولو طبقنا المعادلات (64-4) و (65-4) على المعادلات الاساس (35-38) واستخدمنا العلاقة (4-64) لتوصلنا الى المعادلات (39-42) ولو طبقنا العلاقة (4-65) على المعادلات (39-42) لتوصلنا الى معادلات ماكسويل. وستتناول هنا اشتقاق بعض علاقات ماكسويل باستخدام المعادلة (4-35).

$$dU = TdS - P dV \quad \dots\dots\dots(4-35)$$

وبتطبيق العلاقة (4-64) على هذه المعادلة نحصل على العلاقات:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_T = T \quad \dots\dots\dots(4-43)$$

و

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_P = -P \quad \dots\dots\dots(4-44)$$

وبتطبيق المعادلة (4-65) على المعادلتين (43-4) و (44-4) نحصل على:

$$\left[\frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_T\right]_n = \left[\frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_P\right]_T \quad \dots\dots\dots(4-66)$$

وبتعويض المعادلتين (43-4) و (44-4) في المعادلة (4-65) واجراء التفاضل

نحصل على:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P = - \left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V \quad \dots\dots\dots(4-67)$$

وهذه العلاقة الاولى لماكسويل، وباستخدام المعادلة (4-36)

$$dH = Tds + vdp$$

وبتطبيق العلاقة (4-64) على هذه المعادلة وبالمقارنة ينتج:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_T = T \quad \dots\dots\dots(4-45)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_V = V \quad \dots\dots\dots(4-46)$$

وباستخدام العلاقة (4-65) نحصل على:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{\partial H}{\partial S} \right)_T \right]_V = \left[ \frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_V \right]_T \quad (4-68)$$

وبتعويض معادلتين (45-4) و (46-4) في معادلة (68-4) نحصل على العلاقة الثانية لماكسويل:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (4-69)$$

وباستخدام المعادلة الاساس (37-4)

$$\dots\dots\dots(37-4)$$

والمعادلة (64-4) على الدالة (A) نحصل على المعادلتين (47-4) أو

$$(48-4)$$

$$\left( \frac{\partial A}{\partial T} \right)_V = -S \quad \dots\dots\dots(4-47)$$

$$\left( \frac{\partial A}{\partial V} \right)_T = -P \quad \dots\dots\dots(4-48)$$

وباستخدام العلاقة (65-4) على الدالة (A) نحصل على

$$\left[ \frac{\partial}{\partial V} \left( \frac{\partial A}{\partial T} \right)_S \right]_P = \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial A}{\partial V} \right)_P \right]_S \quad \dots\dots\dots(4-70)$$

وبتعويض المعادلتين 47-4 و 48-4 في 70-4 واجراء التفاضل نحصل على علاقة ماكسويل:

$$-\left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_P = -\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_P \quad \dots\dots\dots(4-71)$$

واخيراً وباستخدام المعادلة (38-4):



$$dG = -S dT + V dP \quad (4-38)$$

وباستخدام المعادلة (4-64) على الدالة G وبالمقارنة نحصل على معادلتى (4-49) و (50-4)

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_s = -S \quad \dots\dots\dots(4-49)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_v = V \quad \dots\dots\dots(4-50)$$

وباستخدام المعادلة (4-65) على الدالة G نحصل على

$$\left[\frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_s\right]_v = \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_v\right]_s \quad \dots\dots\dots(4-72)$$

وبتعويض المعادلتين (4-49) و (50-4) فى (72-4) نحصل على علاقة اخرى لماكسويل:

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_v = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_s \quad \dots\dots\dots(4-73)$$

## 12-4 المعادلة الدينامية الحرارية للحالة

### Thermodynamic equation of state

سنحاول الآن استعمال احدى علاقات ماكسويل وهي المعادلة (4-71) للوصول الى معادلة الحالة.

يمكن كتابة المعادلة الاساس (4-36) بالشكل التالي

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = -P \quad \dots\dots\dots(4-74)$$

وبادخال المعادلة 71-4 فى المعادلة (74-4) نحصل على

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P \quad \dots\dots\dots(4-75)$$

نلاحظ على معادلة (4-75) المعادلة الدينامية الحرارية للحالة. وهذه المعادلة يمكن تطبيقها لأي منظومة مغلقة للوصول الى خواصها الدينامية الحرارية. لذلك ولغاز مثالي فان

$$P = \frac{nRT}{v}$$

وفي ظروف الحجم الثابت يمكن اجراء التفاضل لمعادلة الحالة العامة للغاز المثالي كمايلي:

$$\partial P = \frac{nR}{v} \partial T \quad \dots\dots\dots(4-76)$$

أي ان

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{nR}{v} \quad \dots\dots\dots(4-77)$$

وبتعويض معادلة (4-77) في معادلة (4-75) ينتج:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T = 0 \quad \dots\dots\dots(4-78)$$

تبين هذه المعادلة ان الطاقة الداخلية لغاز مثالي لا تعتمد على التغير في الحجم ونظيرتها  $(U/P)_T$  لا تعتمد على الضغط في درجة الحرارة الثابتة.

#### 4-13 المعادلة الاساس للمنظومات المفتوحة

#### Fundamental equation for open systems

نقد اكتسبت المنظومة المفتوحة هذه التسمية ذلك لانه عندما تضاف الى أية منظومة مغلقة مادة معينة او تسحب منها أو يحصل فيها تفاعلات كيميائية فتغير خواصها الديناميكية الحرارية. وهناك نوعان من المنظومات المفتوحة وهما المتجانسة وغير المتجانسة وسنركز اعتمادنا على المنظومات المتجانسة التي تتكون من طور واحد كالماء، المسك مثلاً. فإذا كانت مثل هذه المنظومة تتكون من عدد K من المكونات

او المواد المختلفة فان طاقتها الداخلية ستكون دالة للانثروبي S. والحجم V والمكونات  $n_1, n_2, \dots, n_K$  الى K من المواد. وهنا يحق لنا اجراء التفاضل الجزئي للطاقة الداخلية على التالي:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{v, n_i} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{s, n_i} dv + \left(\frac{\partial U}{\partial n_1}\right)_{v, s, n_2, \dots, n_i} dn_1 + \left(\frac{\partial U}{\partial n_j}\right)_{v, s, n_i} dn_j \quad \dots\dots\dots(4-79)$$

حيث ان  $j = i$

وتتم عملية تغيير الطاقة الداخلية بثبوت درجة الحرارة والضغط معا. ولدى المقارنة مع المعادلة الاساس للمنظومة المغلقة ( معادلة 35-38) مع اضافة الحدود الجديدة التي تتعلق بعدد المولات  $n_i$  نحصل على المعادلة.

$$dU = TdS - Pvd + \mu_1 dn_1 + \mu_2 dn + \dots \mu_i dn_i \quad \dots\dots\dots(4-80)$$

حيث يرمز للمقدار  $(du/dn_i)_{v, s, n_j}$  بالحرف الذي يطلق عليه بالجهد الكيميائي Chemical potential أى ان:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial u}{\partial n_i}\right)_{v, s, n_j} \quad \dots\dots\dots(4-81)$$

وبنفس الاسلوب يمكن الحصول على المعادلات التالية بالنسبة لتغيرات الانثالبي dH وطاقة هيلمهولتز الحرة dA وطاقة كبس الحرة dG.

$$dU = TdS - Pdv + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i \quad \dots\dots\dots(4-82)$$

$$dH = TdS + vdp + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i \quad \dots\dots\dots(4-83)$$

$$dA = -SdT - PdU + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i \quad \dots\dots\dots(4-48)$$

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i \quad \dots\dots\dots(4-85)$$

وتحمل  $i$  نفس القيمة سواء كانت مشتقة من  $U$  أو  $H$  أو  $A$  أو  $G$  كما مبين ذلك في المعادلة:

$$\begin{aligned} \mu_i &= \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{s,v,n_j} = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{s,p,n_j} = \left(\frac{\partial A}{\partial n_i}\right)_{T,v,n_j} \\ &= \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4-86)$$

يمكن اعتبار الجهد الكيميائي القوة الدافعة للمنظومات الكيميائية نحو ظروف التوازن.

يمكن كتابة المعادلات الأساس للمنظومة المفتوحة (82-85) بالشكل التكاملي عند فرض تقييدات ثبات كل من الضغط ودرجة الحرارة، ومعنى آخر أن  $O=dT$  و  $O=dP$  وعليه تصبح هذه المعادلات كالآتي:

$$U = TS - PV + \sum_{i=1}^K \mu_i n_i \quad \dots\dots\dots(4-87)$$

$$H = TS + \sum_{i=1}^K \mu_i n_i \quad \dots\dots\dots(4-88)$$

$$A = -PV + \sum_{i=1}^K \mu_i n_i \quad \dots\dots\dots(4-89)$$

$$G = \sum_{i=1}^K \mu_i n_i \quad \dots\dots\dots(4-90)$$

حيث يكون ثابت التكامل في كل الاحوال صفرا.

ان للمعادلة (4-90) أهمية بالغة في التطبيق على المحاليل. وحيث ان طاقة كبس الحرة هي خاصية شاملة فانها تزداد بنسبة كمية المادة الموجودة في المنظومة. وعند اجراء التفاضل لهذه المعادلة تصبح كالتالي:

$$dG = \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i + \sum_{i=1}^K n_i d\mu_i \quad \text{.....(4-91)}$$

وبطرح هذه المعادلة من المعادلة (4-85) ينتج

$$\sum_{i=1}^K n_i d\mu_i = -SdT + Vdp \quad \text{.....(4-92)}$$

ويمكن ان توضع المعادلة (4-92) بالشكل التالي

$$\sum n_i d\mu_i = 0 \quad (T, P = \text{ثابت}) \quad \text{.....(4-93)}$$

وهذه هي معادلة كبس — دوهم التي تربط التغيرات في الجهد الكيميائي لمكونات المنظومة مع بعضها البعض عند ثبات كل من الضغط ودرجة الحرارة، فلو اخذنا منظومة ثنائية التكوين يكون مجموع مولاتها الكلي واحد واجريت عليها تغيرات في التركيز بزيادة تركيز احدها على حساب الاخرى فسوف يعبر عنها وفق المعادلة (4-93) بدلالة الكسور المولية كالتالي:

$$X_1 d\mu_1 + X_2 d\mu_2 = 0$$

أو

$$X_1 d\mu_1 + (1 - X_1) d\mu_2 = 0 \quad \text{.....(4-94)}$$

حيث ان  $X_1$  الكسر المولي للمكونة 1 و  $(1-X_1)$  الكسر المولي للمكونة 2. يلاحظ من هذه المعادلة ان التغير في الجهد الكيميائي للمكونة 2 لن يكون مستقلا عن التغير في الجهد الكيميائي للمكونة 1.

## 14-4 الجهد الكيميائي Chemical Potential

لقد جاءت تسمية الجهد الكيميائي في المنظومات الميكانيكية من توقع التغيرات التلقائية التي تتم على أساس فرق الجهد الذي بسببه تنزلق الدقائق من أماكنها بصورة ضيعية. وهذا يعني ان هناك قوة دافعة تحرك هذه الدقائق باتجاه الجهد الأقل. وهذا يدفع بضاقة كبس اخررة نحو النهاية الصغرى. ولهذا السبب نطلق على دالة كبس المولارية بالجهد الكيميائي. فكما مر بنا في الفقرات السابقة فان الجهد الكيميائي يعتمد على الضغط ودرجة الحرارة وتكوينات المنظومة أى ان:

$$\mu(P, T, n_1, n_2, \dots) = \left( \frac{\partial G}{\partial n_1} \right)_{P, T, n_2}$$

من هنا يتعين علينا ان نلم بمعلومات عن تغير الجهد الكيميائي مع الضغط ودرجة الحرارة والتكوين لما له من اهمية بالغة. فمن تطبيق علاقات ماكسويل نحصل على:

$$-\left( \frac{\partial s}{\partial n_i} \right)_{P, T, n_j} = \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \right)_{P, n_i, n} \quad \dots\dots\dots(4-95)$$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial n_i} \right)_{P, T, n_j} = \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial P} \right)_{T, n_i, n} \quad \dots\dots\dots(4-96)$$

يطلق على الكميات في يسار المعادلتين (4-95) و (4-96) بالكميات المولارية الجزئية ويرمز لها بالرمز  $S_i$  و  $V_i$  أي ان:

$$-\bar{S} = \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \right)_{P, n_i, n} \quad \dots\dots\dots(4-99)$$

$$\bar{V}_i = \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial P} \right)_{T, n_i, n} \quad \dots\dots\dots(4-100)$$

يلاحظ تغير الجهد الكيميائي التفاضلي مع سالب الانتروبي المولاري الجزئي عندما تتغير درجة الحرارة ومع الحجم المولاري الجزئي عندما يتغير الضغط.

#### 15-4 الكميات المولارية الجزئية — الحجم المولاري الجزئي

##### Partial molar quantities-Partial molar volume

يمكن ان توصف التوازنات داخل المحاليل بصيغ الدوال الدينامية الحرارية للحالة ويمكن ان نبين كيف تعتمد دوال مثل U و S و H و G على تراكيب المحاليل ويمكن ان نذكر بأن الحجم المولاري الجزئي يعتمد على تركيب المحلول. ويمكن تعريف الحجم المولاري الجزئي يعتمد على تركيب المحلول. ويمكن تعريف الحجم المولاري الجزئي لمكونه بأن التغير في الحجم عندما يذاب موال واحد من المكونة وفي درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت في حجم كبير من المحلول الذي له تركيب محدد.

ان حجم المحلول الثنائي المثالي يساوي مجموع مكوناته لان المحلول ذو المكونة 1 لايتنافر ولايتجاذب مع المحلول ذو المكونة 2 لذلك اذا اضفنا 50 سم<sup>3</sup> من السائل 1 الى 50 سم<sup>3</sup> من السائل 2 لتكون محلول ثنائي مثالي حجمه 100 سم<sup>3</sup> فعلى سبيل المثال لو اضفنا 100 سم<sup>3</sup> من حامض الكبريتيك الى 100 سم<sup>3</sup> من الماء لكان المحلول النهائي 182 سم<sup>3</sup> وبسبب التغير في الحجم هو تأثر كل من الماء والحامض ببعضهما. ان الحجم المولاري الجزئي  $V_A$  للمكونة A في المحلول يمثل الزيادة في حجم المحلول لكل مول من A عند درجة حرارة وضغط محددين، وكذلك عند تركيب محدد للمحلول. ولأن  $V_A$  يمثل التغير في الحجم عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين وعدد مولات من المكونة B يساوي  $n_B$  لذلك فان من الممكن تعريفه بالشكل التالي:

$$V_A = \left( \frac{\partial v}{\partial n_A} \right)_{T,P,n_B} \dots\dots\dots(4-101)$$

ان الحجم الجزئية المولارية مفيدة عندما نعرف قيمها فان بالامكان أن نحسب الحجم المولاري الجزئي لمكونات المحلول.

لمحلول ثنائي مكون من عدد مولات من A يساوي  $n_A$  وعدد مولات من B مساوياً  $n_B$  وإذا اضيف  $dn_A$  من A و  $dn_B$  من B الى المحلول فان الزيادة في الحجم تعطى بالمعادلة التالية:

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial n_A}\right)_{T,P,n_B} dn_A + \left(\frac{\partial V}{\partial n_B}\right)_{T,P,n_A} dn_B \quad \dots\dots\dots(4-102)$$

ومن المعادلة (4-101)

$$dV = V_A dn_A + V_B dn_B \quad \dots\dots\dots(4-103)$$

يمكن اجراء تكامل للمعادلة (4-103) وهذا يعني زيادة حجم المحلول دون تغير تركيبه اى ان  $V_A$  و  $V_B$  تبقى ثابتة وتكون نتيجة ذلك:

$$V = n_A V_A + n_B V_B \quad \dots\dots\dots(4-104)$$

ان المعادلة (4-104) تعني ان حجم المحلول يساوي عدد مولات A مضروبة في الحجم المولارى الجزئي لـ A زائدا عدد مولات B مضروبة في الحجم المولارى للمكونة B. بتفاضل المعادلة (4-104) والتي فيها يتغير كل من عدد المولات والحجم الجزئيين للمكونات نحصل على:

$$dV = n_A dV_A + V_A dn_A + n_B dV_B + V_B dn_B \quad \dots\dots\dots(4-105)$$

من المعادلتين (4-103) و (4-105) نحصل على

$$n_A dV_A + n_B dV_B = 0 \quad \dots\dots\dots(4-106)$$

وهذا مثال آخر لمعادلة كبس — دوهم. ويمكن كتابة هذه المعادلة بشكل اخر وهو:

$$dV_A = -\frac{n_B}{n_A} dV_B = \frac{X_B}{X_B - 1} dV_B \quad \dots\dots\dots(4-107)$$

ان المعادلة (4-107) تسمح لنا بحساب الحجم المولارى الجزئي  $V_A$  الثنائي



إذا عرفنا الحجم المولارى الجزيئي للمكونة الثانية لدالة التكوين أو للكسر المولي للمكونة B أي  $V_B(X_B)$  لذلك من المعادلة (4-107) نحصل على:

$$V_A(X_B) = \int_{(1)}^{X_B} \frac{X'_B}{X'_B - 1} \frac{dV_B}{dX'_B} dX'_B \quad \dots\dots\dots(4-108)$$

### القانون الثالث للدينامية الحرارية Third Law of Thermodynamic

يتعامل هذا القانون مع انتروبي البلورات عند درجة الصفر المطلق ويبين بأن انتروبي البلورات الكاملة يساوي صفراً عند الصفر المطلق. لقد وضع العالمان لويس وارنلد عام 1923 نص القانون الثالث للدينامية الحرارية وهو « إذا كان الانتروبي لكل عنصر في حالة بلورية معينة صفراً في الصفر المطلق لدرجة الحرارة، فإن لكل مادة انتروبي موجب محدد، ولكن في الصفر المطلق الحرارة، قد يصبح الانتروبي صفراً، ويصبح كذلك في حالة المواد البلورية الكاملة ». ان النظرة الاحصائية للانتروبي تقود الى الاستنتاج الذي هو  $O = S_0$  للبلورة الكاملة ففي البلورة الكاملة وفي درجة الصفر المطلق فان كل جزء من البلورة « ذرة، ايون أو جزيئة » سيكون في أوطاً مستوياته الاهتزازية الطاقية ولن تكون له أية طاقة انتقالية أو دورانية وبذلك فان كل جزء من البلورة سيشغل مكاناً محدداً من الشبكة البلورية الكاملة الانتظامية. في بعض الاحيان فان الجزيئات في البلورة لها عدة ترتيبات حتى عند درجة الصفر المطلق وفي هذه الحالة فان  $S_0$  لن تساوي صفراً. فعلى سبيل المثال للجزيئة  $N_2O$  فان هذه الجزيئة داخل البلورة، يمكن ان تأخذ الترتيبين التاليين (ONN NNO) أو (NNO NNO) وفي هذه الحالة فاننا لو اخذنا مول واحد من  $N_2O$  لوجدنا بأن نصف مول سيأخذ الترتيب الاول. والنصف الثاني سيكون له الترتيب الثاني والذي يختلف عن الاول ولو طبقنا المعادلة الخاصة بحساب انتروبي المزيج لحصلنا

$$\Delta S_{mix} = -R \left( \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} \right) = 5.77 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

يثبت القانون الثالث للدينامية الحرارية الحقائق التالية:

1 — ان جميع المواد بحالتها البلورية النقية أو الكاملة وفي درجة حرارة الصفر المطلق تساوي صفرا.

2 — ان الانتروبي  $S_0$  يساوي صفرا لاي تغير كيميائى أو فيزيائى في درجة الصفر المطلق يتضمن بلورة كاملة.

ان أهمية القانون الثالث تنبع من حقيقة امكانية حساب انتروبي البلورات النقية عند درجة الصفر المطلق باستعمال القيم الحرارية فقط وباستخدام المعادلة التالية التي تم اشتقاقها سابقا:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \frac{C_p}{T}$$

وبتكامل هذه المعادلة آخذين بنظر الاعتبار الظروف التي يحددها لنا القانون الثالث

$$\int_{S=0}^{S=S} ds = \int_{T=0}^{T=T} C_p dT / dT$$

$$S_T = \int_0^T \frac{C_p dT}{T}$$

أو

$$S_T = \int_0^T c_p d \ln T \quad \dots\dots\dots(4-109)$$

ان  $S_T$  هي الانتروبي المطلق في درجة الصفر المطلق وهي كمية موجبة دائما، وكل ماتحتاجه للوصول الى هذا الانتروبي هي معرفة السعة الحرارية للمواد الصلبة مقاسة من درجة الصفر المطلق نسبة الى الدرجة التي نرغب بها.

يمكن استعمال المعادلة (4-109) للوصول الى قيمة  $\Delta S$  وذلك برسم  $C_p$  مقابل  $\ln T$  أو  $C_p/T$  مقابل  $T$  وحساب المساحة تحت المخطط من  $T=0$  الى درجة حرارة  $T$ ، كذلك يمكن الحصول على قيم الانتروبي المطلقة للمواد التي هي في الحالة الغازية او السائلة في درجة حرارة الغرفة، لأن الانتروبي المقاس هو عبارة عن مجموع انتروبيات الحالات المختلفة. فعلى سبيل المثال اذا كانت هنالك مادة في الطور الغازي في درجة حرارة  $25^\circ$  وضغط ١ جو فان الانتروبي عبارة عن مجموع العمليات الحسابية للخطوات التالية:

- 1 — تسخين البلورات من درجة الصفر المطلق الى درجة الانصهار  $T_f$ .
- 2 — انتروبي الانصهار  $\Delta H_f/T_f$ .
- 3 — انتروبي تسخين السائل من  $T_f$  الى  $T_b$ . درجة الغليان.
- 4 — انتروبي التبخير  $\Delta H_v/T_v$ .
- 5 — انتروبي تسخين الغاز من  $T_b$  الى درجة  $298.15^\circ$  ويمكن تمثيل هذه التغيرات بالمخطط التالي:

$$\begin{array}{c}
 \Delta S_1 = \int_0^{T_f} C_{p,sd} \ln T \quad \Delta S_f = \frac{\Delta H_f}{T_f} \\
 \text{Solid } \xrightarrow{T=0} \text{ Solid } \xrightarrow{T=T_f} \text{ Liquid} \\
 \\
 \Delta S_2 = \int_{T_f}^{T_b} C_{p,L} d \ln T \\
 \\
 \Delta S_3 = \int_T^{298} C_{p,g} d \ln T \quad \Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_b} \\
 \\
 \text{Gas } \xleftarrow{T=298.15 \text{ K}} \text{ Gas } \xleftarrow{T=T_b} \text{ Liquid} \\
 T = 298.15 \text{ K} \quad T = T_b \quad T = T_b
 \end{array}$$

ويمكن كتابة المعادلة العامة لمجموع هذه التغيرات كما يلي:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{total}} &= \Delta S_1 + \Delta S_f + \Delta S_2 + \Delta S_v + \Delta S_3 \\ &= \int_0^T C_{p_s} d \ln T + \frac{\Delta H_f}{T_f} + \int_{T_f}^{T_b} C_p d \ln T + \\ &\quad \frac{\Delta H_v}{T_b} + \int_{T_b}^T C_{p_g} d \ln T\end{aligned}$$

هنالك مسعر خاص لقياس الساعات الحرارية في الدرجات المنخفضة ونستعمل طرق خاصة لذلك.

ان تبخر سائل الهيليوم « درجة الغليان » 4.2 مط بالضغط السريع يولد درجات حرارة في حدود 0.3 مط واذا رغبتنا في الوصول الى درجات حرارة اوطأ بواسطة ازالة المغنطة بعملية كظيم. اذ يبرد ملح بارا مغناطيسي « كبريتات الكادولينيوم مثلاً » باستعمال سائل الهيليوم وبوجود مجال مغناطيسي قوى، ويعزل الملح حرارياً من محيطه وأزالة المجال المغناطيسي تدريجياً فيعاني الملح عملية رجوعية كظيم يصبح بها البرم الذرى غير منتظم. ولما كانت الطاقة تأتي من التركيب البلوري فان الملح يبرد. ويمكن الوصول الى درجات حرارة تعادل 0.001 مط. ويمكن للترسيب الى درجات حرارة تساوي جزء من مليون درجة كلفن باستعمال تقنية ازالة المغنطة لعملية كظيم للبرم النووي والجداول 1 و 2 تعطي انتروبيات القانون الثالث  $S_0$  في درجة 25 لعدد من العناصر والمركبات والايونات.

جدول (1): الانتروبي لثاني اوكسيد الكربون

Temperature, K	Method of Calculation	$\Delta S,$ $\text{cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
0-15	Debye function ( $C_p = \text{constant } T^3$ )	0.30
15-197.64	Graphical, solid	20.12
179.64	Fusion, 1769.1/179.64	8.95
197.64-263.08	Graphical, liquid	5.96
263.08	Vaporization, 5960/263.08	22.06
263.08-298.1	From $G_p$ of gas	1.25
		—
		$S_{298}^0 = 59.64$

مثال (8)

باستعمال الجدول (2) احسب  $\Delta S_{298}^0$  للتفاعل التالي:



جدول (2): انتروبيات القانون الثالث في 25°

$S^\circ$  in Cal K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>

Elements and Inorganic Compounds					
O <sub>2</sub> (g)	49.003	NO(g)	50.339	AgCl(s)	22.97
O <sub>3</sub> (g)	56.8	NO <sub>2</sub> (g)	57.47	Fe(s)	6.49
H <sub>2</sub> (g)	31.211	NH <sub>3</sub> (g)	46.01	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	21.5
H <sub>2</sub> O(g)	45.106	HNO <sub>3</sub> (l)	37.19	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	35.0
H <sub>2</sub> O(l)	16.716	P(g)	38.98	Al(s)	6.769
Hc(g)	30.126	P(s,white)	10.6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	12.186
Cl <sub>2</sub> (g)	53.286	PCl <sub>3</sub> (g)	74.49	UF <sub>6</sub> (g)	90.76
HCl(g)	44.617	PCl <sub>5</sub> (g)	84.3	UF <sub>6</sub> (s)	54.45
Br <sub>2</sub> (g)	58.639	C(s,diamond)	0.5829	Ca(s)	9.95
Br <sub>2</sub> (l)	36.4	C(s,graphite)	1.3609	CaO(s)	9.5
HBr(g)	47.437	CO(g)	47.301	CaCO <sub>3</sub> (s)	22.2
HI(g)	49.314	CO <sub>2</sub> (g)	51.061	Na(s)	12.2
S(rhombic)	7.62	Pb(s)	15.51	NaF(s)	14.0
S(monoclinic)	7.78	PbO <sub>2</sub> (s)	18.3	NaCl(s)	17.3
SO <sub>2</sub> (g)	59.40	PbSO <sub>4</sub> (s)	35.2	K(s)	15.2
SO <sub>3</sub> (g)	61.24	Hg(g)	41.80	KF(s)	15.91
H <sub>2</sub> S(g)	49.15	Hg(l)	18.5	KCl(s)	19.76
N <sub>2</sub> (g)	45.767	Ag(s)	10.206		

Organic Compounds

Methane, CH <sub>4</sub> (g)	44.50	Propylene, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	63.80
Ethane, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	54.85	1-Butene, C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> (g)	73.48
Propane, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	64.51	Acetylene, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	47.997
n-Pentane, C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	74.10	Formaldehyde, CH <sub>2</sub> O(g)	52.26
Isobutane, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	70.42	Acetaldehyde, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O(g)	63.5
n-Pentane, C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	83.27	Methanol, CH <sub>3</sub> OH(l)	30.3
n-Hexane, C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g)	92.45	Ethanol, CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH(l)	38.4
n-Heptane, C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (g)	101.64	Formic acid, HCO <sub>2</sub> H(l)	30.82
n-Octane, C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	110.82	Acetic acid, CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H(l)	38.2
Benzene, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	64.34	Oxalic acid, (CO <sub>2</sub> H) <sub>2</sub> (s)	28.7
Benzene, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	41.30	Carbon tetrachloride, CCl <sub>4</sub> (l)	51.25
Ethylene, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	52.45	Glycine, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> (s)	26.1

Ions in H<sub>2</sub>O

H <sup>+</sup>	15.606	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.1	Cu <sup>2+</sup>	-23.6
OH <sup>-</sup>	-18.125	HS <sup>-</sup>	14.6	Ag <sup>+</sup>	17.67

Ions in H<sub>2</sub>O(Continued)

F <sup>-</sup>	-17.9	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	35.0	Mg <sup>2+</sup>	-28.6
Cl <sup>-</sup>	-2.44	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	26.97	Ca <sup>2+</sup>	-13.2
ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	43.5	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-52	Li <sup>+</sup>	3.4
Br <sup>-</sup>	19.29	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-12.7	Na <sup>+</sup>	30.0
I <sup>-</sup>	26.14	Zn <sup>2+</sup>	-25.45	K <sup>+</sup>	24.5
S <sup>2-</sup>	5.3	Cd <sup>2+</sup>	-14.6		

Gaseous Atoms

H <sub>2</sub>	27.3927	Br	41.8052	N	36.6147
F	37.917	I	43.184	C	37.76
Cl	39.4569				

الحل

$$\Delta S_{298}^{\circ} = 2S^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) + S^{\circ}(\text{CO}_2) - S^{\circ}(\text{CH}_4) - 2S^{\circ}(\text{O}_2)$$

$$\Delta S^{\circ} = 2(188.7) + 213.7 - 186.2 - 2(205.1)$$

$$= -5.3 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

يمكن حساب انتروبيات القانون الثالث لجزيئات بسيطة باستخدام علم الاطيف وكذلك باستعمال الميكانيك الاحصائي. ان مقارنة الانتروبيات المحسوبة نظريا مع الانتروبيات المقاسة باستعمال السعات الحرارية على اساس القانون الثالث

تقع ضمن الخطأ التجريبي باستثناء عدد من المركبات مثل  $H_2$  و  $CO$  و  $N_2O$  فإن القيم المسعرة تختلف عن القيم الطيفية، ويغل سبب الاختلاف بالنسبة للهيدروجين على اساس وجود هذا الغاز بشكل اورثو وبارا. أما بالنسبة لاول اوكسيد الكربون  $CO$  فإن ترتيب المادة في الحالة البلورية يكون غير منتظم كان تكون على شكل  $CO$  و  $OC$  و  $CO$  و  $OC$ . أما بالنسبة الى  $N_2O$  فإن سبب الاختلاف يعود ايضاً الى وجود ترتيبات مختلفة ضمن البلورة مثل  $ONN$  و  $NNO$  كما ذكرنا سابقا ان انتروبي المشرح لاصناف تختلف نظائرياً تهمل في التطبيقات الكيميائية.

## مسائل الفصل الرابع

1 — وضعت عينة من غاز الهيدروجين في اسطوانة مقطوعها العرضي 5 سم<sup>2</sup> فشغل حجماً مقداره نصف لتر أحدث ضغطاً عند درجة حرارة 25° مقداره 2 جو ماهو التغير في الانتروبي للغاز اذا ازداد حجم الاسطوانة عند درجة حرارة ثابتة بمقدار 100 سم

الجواب:  $0.24 \text{ JK}^{-1}$ .

2 — احسب تغير الانتروبي عندما يتمدد غاز الاركون الموضوع في دورق حجمه 500 سم<sup>3</sup> وفي درجة حرارة 25°، ضغط 1 جو الى حجم لتر ويسخن الى درجة 100°.

الحل:  $0.171 \text{ JK}^{-1}$ .

3 — ماهو التغير في الانتروبي عندما تسكب 50 غرام من الماء الساخن عند درجة 80° م على 100 غرام من الماء عند درجة 10° م موضوعة في دورق منعزل علماً بأن  $C_{p,m} = 75.5 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

الجواب:  $2.83 \text{ JK}^{-1}$ .

4 — احسب الفرق في طاقة جبس الحرة بين الماء والتلج في درجة 5°- وبين الماء وبخار الماء في 95°.

الجواب:  $0.11 \text{ KJ mol}^{-1}$ ,  $0.34 \text{ KJ mol}^{-1}$ .



5 — بين بأن للغاز المثالي:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s = -P, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v = T$$

6 — بين بأن:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$$

وبأن:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_P$$

7 — احس التغير في انتروبي المنظومة والمحيط واللون لغاز النتروجين الذي يزن 14 غرام في درجة 25° م والذي يضاعف حجمه عند:

(أ) تمدد رجوعي عند درجة حرارة ثابتة.

(ب) تمدد لارجوعي تحت درجة حرارة ثابتة.

(ج) تمدد كظيم رجوعي.

$$\Delta S_{\text{surr}} = 0, \quad \Delta S_{\text{sy}} = 2.88 \text{ JK}^{-1} \quad (\text{أ})$$

$$\Delta S_{\text{un}} = 2.88 \text{ JK}^{-1}$$

$$\Delta S_{\text{surr}} = 0, \quad \Delta S_{\text{sy}} = 2.88 \text{ JK}^{-1}, \quad \Delta S_{\text{un}} = 2.88 \text{ JK}^{-1} \quad (\text{ب})$$

$$\Delta S_{\text{un}} = 0, \quad \Delta S_{\text{surr}} = 0, \quad \Delta S_{\text{sy}} = 0 \quad (\text{ج})$$

8 — يبلغ انثالبي الاحتراق للكلوكوز  $-2808 \text{ KJmol}^{-1}$  في درجة 25° م و G في نفس درجة الحرارة هي  $-2862 \text{ KJmol}^{-1}$  هل التفاعل محبذ أم لا من ناحية الدينامية الحرارية عندما ترتفع درجة حرارة الدم الى 37° م؟

الحل:

التفاعل محبذ من ناحية الدينامية الحرارية:

9 – 1,3,5-trichloro-2,4,6-triflorobenzene هو ناتج وسطي في تحويل سداسي كلوروبنزين الى سداسي فلوروبنزين. ثم الحصول على القيم التالية لهذا التفاعل:

T/K	14.14	16.33	20.03	31.15	44.08	64.81
C <sub>p</sub> , p						
JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	9.492	12.70	18.18	32.54	46.86	66.36
T/K	100.90	140.86	183.59	225.1	262.99	298.06
C <sub>p</sub> , m	95.05	121.3	144.4	163.7	180.0	196.4
JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>						

احسب انتروبي القانون الثالث للدينامية الحرارية، انثالبي المولارى، ودالة الطاقة الحرة في 298 مط.

# الفصل الخامس

## 1-5 حالات المادة State of Matter

تبين من خلال دراسة خواص المادة انه لا يمكن دراسة جزيئة واحدة من المادة دون الاخذ بنظر الاعتبار تأثيرات الجزيئات الاخرى الموجودة معها. ويشكل مجموع هذه الجزيئات ما يسمى بالمادة (Matter)، حيث يمكن تقسيمها الى مادة في الحالة الغازية او السائلة او الصلبة.

تختص الحالة الغازية للمادة يتأثر حجمها عند تغير كل من الضغط ودرجة الحرارة، كما ان الغاز يشغل اي حيز يوضع فيه بسبب ضعف القوى الجزيئية او الترابط السطحي لجزيئات الغاز وبذلك يصبح حجم الغاز قابلاً للانضغاط. اما المادة السائلة فليس لها شكل ثابت وتأخذ الشكل الذي تحل فيه، ومع هذا فان هنالك اختلافاً جوهرياً بين المادة السائلة والمادة الغازية، اذ ان الاولى لها سطح محدود وتأخذ حجماً ثابتاً مقارنة بالمادة الغازية التي ليس لها سطح محدد وتأخذ اي حجم يحل فيه الغاز، بسبب ضعف الترابط بين جزيئات الغاز. وعليه تكون كثافة المادة السائلة اكبر بكثير من كثافة المادة في الحالة الغازية تحت الظروف الثابتة.

تختلف المادة الصلبة عن المادة الغازية او المادة السائلة، بانها تمتلك شكلاً ثابتاً، وان حجمها يكون ثابتاً تقريباً عند ثبوت الضغط ودرجة الحرارة كما انها تتغير الى الحالة السائلة عند درجات الحرارة العالية. وبذلك يمكن الاستنتاج ان الحالة السائلة للمادة هي وسطية بين المادة في حالتها الصلبة والغازية فيما يتعلق بالخواص الفيزيائية للمادة. مثل قابلية الانضغاط، الكثافة، قوى الترابط بين الجزيئات.

وسوف يتم التطرق الى الحالة الغازية في سلوكها المثالي والحقيقي.

## 2-5 معادلة الحالة Equation of State

من خلال قوانين الغازات المثالية ونخص هنا قانون بويل وقانون كاي لوساك (Boyle and Gay- Lussat Laws)، تم استنتاج معادلة الحالة للغازات المثالية من دمج كلا العلاقتين في القانونين اعلاه للحصول على العلاقة الرياضية لمعادلة الحالة التي تمثل علاقة حجم الغاز مع درجة الحرارة وضغطه.

ومن خلال قانون بويل، فإن العلاقة بين حجم الغاز المثالي وضغطه عند ثبوت درجة الحرارة تمثل بالعلاقة ادناه:

$$PV = \text{constant} \quad \dots\dots\dots(5-1)$$

حيث  $P$  ضغط الغاز، و  $V$  حجمه.

وعند تغير ضغط الغاز من  $P_1$  الى  $P_2$  فإن هذا التغير يكون مصاحباً بتغير حجم الغاز من  $V_1$  الى  $V_2$  وبذلك يمكن وضع المعادلة التالية:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots\dots\dots(5-2)$$

اما قانون شارل والذي ايضاً قد اكتشفت صيغته من قبل العالم كاي لوساك، والذي ينص على ان حجم الغاز المثالي عند درجة الصفر المئوي يتقلص بمقدار ثابت قدره  $(1/273.15)$  من حجمه الاصيل عند تبريده درجة مئوية واحدة، ويمثل رياضياً وفق العلاقة التالية:

$$V = \frac{T}{273.15} V_0 \quad \dots\dots\dots(5-3)$$

حيث ان  $V_0$  حجم الغاز المثالي عند درجة حرارة الصفر المئوي او  $(273.15 \text{ K})$  مطلق،  $V =$  حجم الغاز المثالي عند درجة حرارة  $(T)$ . وكما اسلفنا سابقاً ان دمج قانون بويل وقانون كاي لوساك يؤدي الى ايجاد سلوك الغاز المثالي نسبة ضغط، حجم ودرجة حرارة الغاز كما هو مبين من الرسم ادناه:

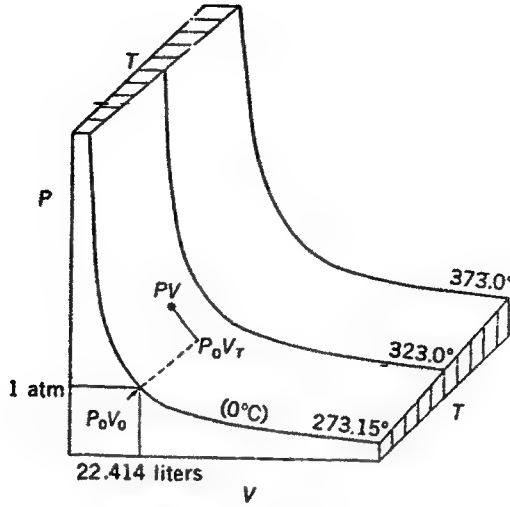


FIGURE 1.5

PV isotherms for a perfect gas.

الشكل (1-5): PV: للغازات المثالية بثبوت درجة الحرارة

ان النقطة  $P_0V_0$  عند خط درجة الصفر المئوي تقع عند ضغط جو واحد وحجم مولي قدره 22.414 لترًا، وبمعنى آخر تمثل مول واحد من الغاز عند ظروف مثالية.

عند ثبوت الضغط (عملية ايسوبارية) والتحرك من النقطة  $P_0V_0$  الى النقطة  $P_0V_T$  فان المعادلة (3-5) يمكن ان تصاغ بالصورة التالية:

$$P_0V_T = P_0V_0 \frac{T}{273.15} \quad \dots\dots\dots(5-4)$$

حيث ان  $V_T$  هو حجم الغاز عند درجة الحرارة (T). واستناداً الى قانون بويل فان المعادلة (4-5) يمكن ان تكتب على النحو التالي:

.....(5-5)

ولما كانت 273.15 تمثل درجة الحرارة القياسية او درجة الصفر المئوي وتساوي ( $T_0$ )، وبالتعويض في المعادلة (5-5) نحصل على المعادلة ادناه:

$$PV = \frac{P_0V_0}{T_0} \cdot T \quad \dots\dots\dots(5-6)$$

وبترتيب المعادلة (5-6) نحصل على العلاقة الآتية :

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} \quad \dots\dots\dots(5-7)$$

ولما كان المقدار  $(P_0 V_0 / T_0)$  مقدراً ثابتاً فإن المعادلة (5-7) يمكن وضعها كما يلي :

$$\frac{PV}{T} = \text{constant} \quad \dots\dots\dots(5-8)$$

المعادلة (5-8) هي صيغة لمعادلة الحالة (Equation of State) للغاز الذي ينطبق عليه قانون بويل وقانون كاي لوساك . لذلك عند وجود كتلة معلومة من غاز معين ، فإن أي تغير في درجة الحرارة وضغط هذا الغاز سوف يؤدي إلى تغير في الحجم بحيث يبقى المقدار  $(PV/T)$  ثابتاً .

### (3-5) معادلة الحالة للغاز المثالي The Ideal Gas State Equation

توصلنا في الفقرة السابقة إلى أن المقدار الثابت في المعادلة (5-8) يعتمد على التغير في الحجم والضغط ودرجة الحرارة للغاز المثالي . كما أنه يعتمد على كتلة وطبيعة الغاز . وعند ربط قيمة هذا الثابت بقانون أفكادرو (Avogadro's law) يعطي تبسيطاً كبيراً لهذه العلاقة واستناداً إلى هذا القانون ينص على أن العدد المتساوي من جزيئات الغازات المختلفة يحتل حجماً متساوياً عند درجة حرارة وضغط معينين . وعليه إذا تساوى عدد الجزيئات لغازات مختلفة عند ثبوت درجة الحرارة والضغط فإنها تشغل حجوماً متساوية . وعليه فإن الثابت في معادلة (5-8) له قيمة معينة لا تعتمد على نوعية الغاز المدروس .

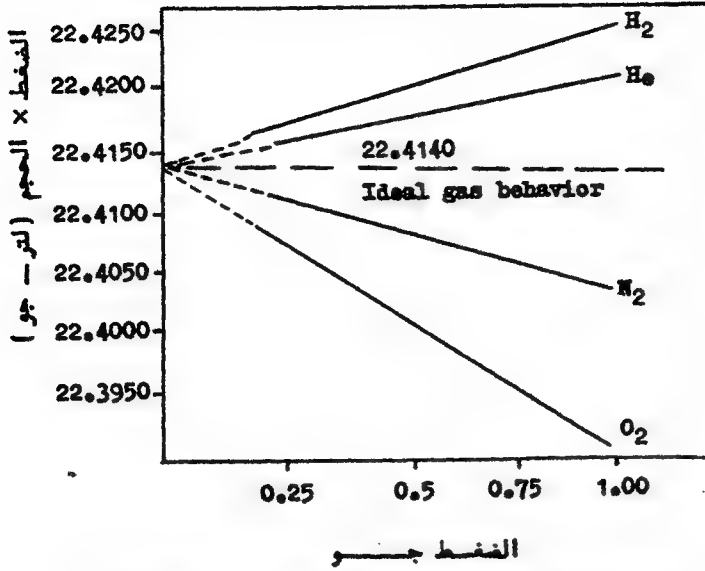
مثلاً ، أن المول الواحد من غاز ما أو الوزن الجزيئي الغرامي منه يحتوي على نفس العدد من الجزيئات ، على اعتبار أن المول من الغاز يأخذ قيمة المقدار  $PV/T$  التي تكون ثابتة واطلق عليها بثابت الغاز  $(R)$  (Gas Constant) ولذا فإن :

$$\frac{PV}{T} = R \quad \dots\dots\dots(5-9)$$

حيث  $V$  هو حجم الغاز المشغول بمول واحد من الغاز ويدعى ايضاً بالحجم المولاري (Molar Volume) عند ضغط ( $P$ ) ودرجة حرارة ( $T$ ).  
وعندما يكون عدد المولات ( $n$ ) فان هذه المعادلة تصبح كالآتي :

$$PV = nRT \quad \dots\dots\dots(5-10)$$

ويطلق على هذه المعادلة بمعادلة الحالة العامة للغاز المثالي الذي تنطبق عليه قوانين الغازات، وبشكل تقريبي يمكن ان تنطبق هذه القوانين على الغازات الحقيقية عند ضغط نسبي منخفض وفي درجات حرارة عالية. ومع ذلك فان الغازات الحقيقية تعاني شذوذاً في انطباق قوانين الغازات عليها ويكون هذا الشذوذ على ذروته عند اقتراب ضغط الغاز ودرجة حرارته من الحالة التي يقترب فيها الغاز من التكثف الى الحالة السائلة. عليه لايمكن اعتبار معادلة الحالة (5-10) صحيحة في تطبيقها على الغازات الحقيقية، اذ تنشأ صعوبة في ايجاد قيمة ثابت الغاز ( $R$ ) الذي ياخذ مقداراً ثابتاً في حالة الغازات المثالية وبصورة عامة فان الغازات الاعتيادية لاتسلك سلوكاً مثالياً عند الظروف الاعتيادية، من النتائج المختبرية اثبت ان سلوك الغازات الحقيقية يقترب من السلوك المثالي كلما انخفض ضغط الغاز. وعند اخذ حجم معين من غاز حقيقي ونخفض ضغط الغاز وقياس حجمه لعدة قيم ثم رسم قيم  $PV$  مقابل قيم  $P$  كما في الشكل (5-2) وعند اجراء هذه القياسات لعدة غازات حقيقية، نلاحظ ان كافة الخطوط المرسومة عندما يكون الضغط يساوي صفراً فانها تلتقي بنقطة واحدة، ولذا فان خواص هذه الغازات عند هذه النقطة تكون واحدة ولا تعتمد على طبيعة الغاز وهي نفسها خواص الغاز المثالي :



الشكل (2-5): تغير قيم ضغط × الحجم ( مع ضغط الغاز .

لوحظ من قياس حجم الغازات عند ضغوط مختلفة بثبوت درجة الحرارة ومد النتائج المرسومة الى ضغط يساوي صفراً كما مبين في الشكل (2-5) ان حجم المول الواحد من الغاز المثالي عند الظروف القياسية ضغط قياسي مقداره 1 جو ( 760 ملم زئبق ) ودرجة حرارة قياسية 273.15 درجة مطلقة يساوي 22.144 لترًا .

يؤدي رفع درجة الحرارة الى تمدد في حجم الغاز المثالي ، ومن نتائج تأثير درجة الحرارة على حجم غاز معين لعدة ضغوط ثابتة ، فقد وجد ان القيمة المحددة لمعامل التمدد (Coffiient of expansion) عندما يكون ضغط الغاز يقارب الصفر انها تساوي 0.0036610 لكل درجة مئوية ، وعليه تصبح درجة الصفر بالنظام المطلق (Kelvin Scale), (OK°) تساوي :

$$OK = - \frac{1}{0.0036610} = - 273.15 \quad \dots\dots\dots(5-11)$$

واستناداً الى العلاقة اعلاه فان درجة الحرارة بالنظام المثوي او درجة الصفر المثوي تساوي (273015 K) .



#### 4-5 تعيين ثابت الغاز

عند تعيين قيمة ثابت الغاز يجب اختيار الوحدات المناسبة للثابت (Units)، إذ لها أهميتها وخصوصيتها عند استعماله في الحسابات الفيزيائية أو قوانينها.

والتعريف المناسب لثابت الغاز يكون حسب المعادلة أدناه:

$$R = \frac{PV}{nT} \quad \text{.....(5-12)}$$

وتكون قيم، الضغط، والحجم، ودرجة الحرارة، وعدد المولات كالآتي:

القوة

\_\_\_\_\_ = الضغط

$(\text{المسافة})^2$

لذلك تكون مقادير ثابت الغاز كالآتي:

$$R = \frac{(\text{المسافة})^3 \times (\text{المسافة})^{-2} \times \text{القوة}}{\text{مول} \times \text{درجة}}$$

وبما أن حاصل ضرب القوة  $\times$  المسافة = الطاقة، لذلك:

الطاقة

$$R = \frac{\text{الطاقة}}{\text{درجة} \times \text{مول}}$$

أي أن:

$$R = \text{طاقة لكل درجة لكل مول.}$$

وتأخذ الطاقة وحدات عديدة فيمكن أن تكون وحداتها جول أو أرك أو سرعة حرارية أو لتر - جو.

وعليه فإن ثابت الغاز يمكن أن يأخذ الوحدات التالية:

— 1

$$R = \frac{PV}{T} = \frac{1 \times 22.414}{273.15}$$

( لتر — جو لكل درجة لكل مول )  $R = 0.08205$

حيث ان لتر وحدة الحجم، والجو وحدة الضغط ودرجة الحرارة بالنظام المطلق، ولمول واحد من الغاز .

— 2

يجب ان يوصف الضغط بوحدات CM- gm- Sec ( — سم — غرام — ثانية ) او ما يسمى دايين لكل سنتيمتر مربع، اما الضغط الجوي اي جو واحد فانه يكافئ:

$$\text{داين سم} = 980.66 \times 13.595 \times 760 = 1 \text{ جو}$$

حيث المقدار 980.66 التعجيل الارضي بوحدات ( سم-2 ثا ) وبذلك يكون:

$$\text{داين-سم} = 1.0132 \times 10 = 1 \text{ جو}$$

وكما هو معروف فان حجم مول واحد من غاز مثالي عند الظروف القياسية يشغل 22.414 لتراً او 22414 مليلترا:

$$R = \frac{PV}{T} = \frac{(22414) (1.0132 \times 10^6)}{(273.15)}$$

ولما كان  $10^7$  ارك = جول واحد لذلك تكون وحدات ثابتة الغاز كالآتي:

$$R = 8.314 \text{ جول لكل درجة لكل مول}$$

$$3 \text{ — سرعة لكل درجة حرارة لكل مول} = R$$

$$R = \frac{8.314 \times 10^7}{4.184}$$

$$R = 1.987 \text{ سرعة لكل درجة حرارة لكل مول}$$

وهكذا تصبح وحدات R مقدرة سرعة لكل درجة حرارة لكل مول مقارنة من (2.0). وكما يتضح من قيم R فان قيمته لها خصوصيتها عند التعويض في المعادلات وحسب الوحدات المناسبة.

## 5-5 الغازات الحقيقية ideal gases

ان علاقة التغير بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة تم تحديدها بمعادلة سميت بمعادلة الحالة للغازات المثالية، ويكون الغاز مثالياً اذا خضع لقوانين الغازات المختلفة ومنها معادلة الحالة (5-10). ومن خلال دراسة سلوك الغازات المختلفة وجد ان قسماً قليلاً من هذه الغازات تخضع لمعادلة الحالة للغاز المثالي تحت الضغوط المنخفضة ودرجات الحرارة العالية. اما عند الضغوط العالية ودرجات الحرارة الواطئة فقد لوحظ انحراف واضح وكبير عن السلوك المثالي. ويمكن ملاحظة مدى هذا الانحراف للغاز عن السلوك المثالي عند النظر الى المعادلة.

$$PV = nRT \quad \text{.....(5-10)}$$

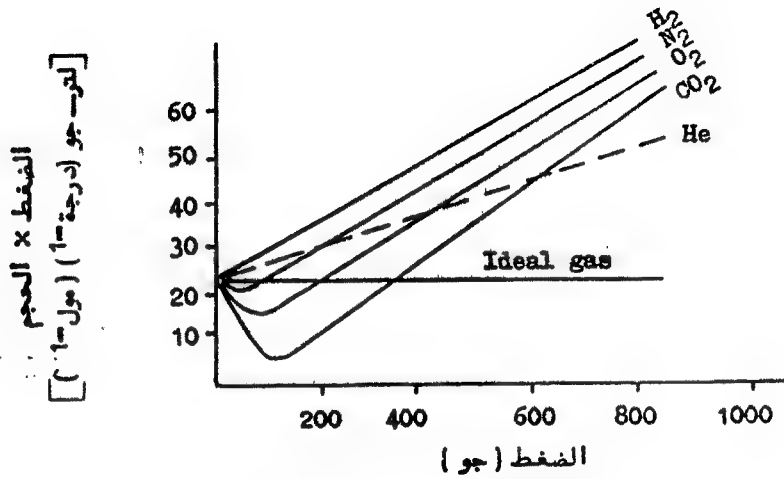
عند ثبوت درجة الحرارة فإن المعادلة اعلاه تختزل الى :

$$PV = \text{Constant}$$

والتي هي قانون بويل، وباختصار فان حاصل الضرب  $PV$  لغازات مختلفة بثبوت درجة الحرارة يجب ان يبقى ثابتاً تحت كافة الضغوط .

لذا عند رسم قيم  $PV$  مقابل قيم الغاز  $P$  عند درجة حرارة الصفر المئوي، يجب ان يستنتج خطأً مستقيماً موازياً للاحداثي السني وكما في الشكل (3-5).

نلاحظ من الرسم وجود خط مستقيم منقطع يمثل سلوك الغازات المثالية والتي تكون قيمة المقدار  $PV$  كمية ثابتة بثبوت درجة الحرارة. كما ان بقية الغازات الاخرى تشذ عن المثالية بشكل او باخر، حيث المقدار  $PV$  لاساوي مقداراً ثابتاً مع زيادة الضغط. في حدود الضغط صفر، تسلك جميع الغازات سلوكاً مثالياً. ومن الرسم البياني (3-5) نلاحظ تكون نوعين من المنحنيات :



الشكل (3-5) تغير ضغط الغاز مع PV

- 1 — زيادة مستمرة في قيم PV بزيادة ضغط الغاز P، وتحصل مثل هذه الحالة في الغازات التي تمتلك جزيئات صغيرة نسبياً مثل  $H_2$ ،  $He$ .
- 2 — انخفاض في قيم PV بزيادة الضغط في البداية ماراً بقيمة صغرى ثم الزيادة مع ازدياد ضغط الغاز. ويحدث مثل هذا السلوك في الغازات التي تمتلك جزيئات كبيرة مثل  $O_2$  و  $N_2$  و  $CO_2$ .

تكون النسبة  $1 = PV/RT$  في الغازات المثالية، وتدعى هذه النسبة بمعامل الانضغاطية (Compressibility factor) ولا تساوي واحداً في حالة الغازات الحقيقية ويمكن اظهار انحراف هذه الغازات عن السلوك المثالي من معرفة مقدار معامل الانضغاطية الذي يمثل بالمعادلة ادناه:

$$Z = \frac{PV}{RT} \quad \dots\dots\dots(5-12)$$

حيث  $V$  = حجم مول واحد من الغاز عند درجة حرارة  $T$  وضغط  $P$ ،  
ولكن في حالة الغاز المثالي فان:

$$(PV)_{ideal} = RT \quad \dots\dots\dots(5-13)$$

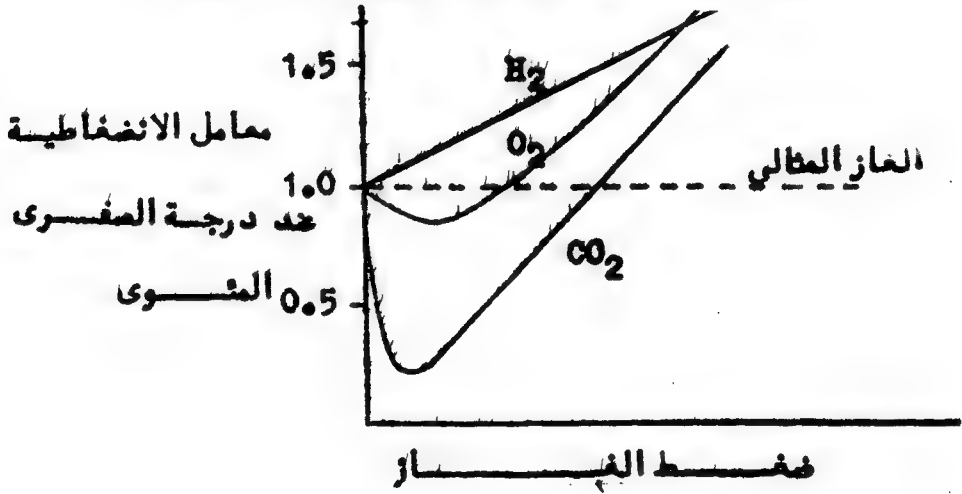
ومن المعادلتين (5-12) و (5-13) نحصل على العلاقة التالية:

$$Z = \frac{PV}{(PV)_{ideal}} \dots\dots\dots(5-14)$$

ولهذا يعتبر معامل الانضغاطية دليلاً واضحاً للانحراف عن التصرف المثالي للغازات الحقيقية .

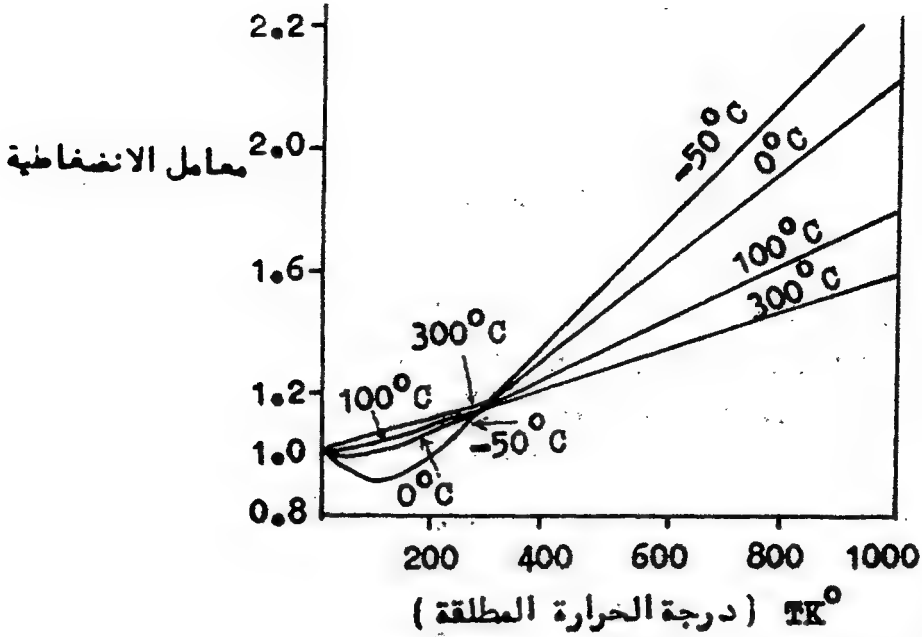
وتدل قيمة (Z) التي تكون اقل من واحد على ان الغاز قابل للانضغاط اكثر من الغازات المثالية . كما تظهر كافة الغازات نهاية صغرى (minimum) من رسم مقدار (Z) مقابل الضغط (P) وعندما تكون درجة حرارة الغازات واطئة . بينما يعطي غاز الهيدروجين نهاية صغرى في درجات حرارة اوطأ من درجة الصفر المئوي .

وبين الشكل (4-5) ، تأثير معامل الانضغاطية بزيادة ضغط الغاز ،



الشكل (4-5) تأثير زيادة ضغط الغاز على معامل الانضغاطية .

كما وبين الشكل (5-5) مدى تأثير درجة الحرارة على تغير معامل الانضغاطية للغاز الحقيقي بتغير ضغط الغاز وكما يلي :



الشكل (5-5) تأثير تغير درجة الحرارة على معامل الانضغاطية بتغير ضغط غاز النيتروجين .

يظهر من الشكل (5-5) انه كلما انخفضت درجة حرارة الغاز كلما كان الانحناء في المنحنى اكثر وضوحاً كما هو الحال مع غاز  $N_2$  حيث تكون قيمة  $Z=1$  عندما يكون  $P=0$  صفرًا وتتغير قيمة  $Z$  عند ازدياد الضغط بطريقة معتمدة على درجة الحرارة فعندما ترتفع درجة الحرارة تصبح النهاية الصغرى في المنحنى اصغر، وتزاح نحو الضغوط الواطئة. كما ان هناك درجة حرارة تبقى فيها قيمة  $Z$  قريبة من واحد وعلى مدى واسع من الضغوط وتساوي الى  $50^\circ\text{M}$  في حالة غاز النيتروجين، وتعرف بدرجة حرارة بويل او نقطة بويل وهي صفة الغاز، حيث لكل غاز من الغازات نقطة بويل. وعندما تكون درجة الحرارة تحت درجة حرارة بويل، تقل قيمة  $Z$  اولاً بزيادة الضغط، ومن ثم تمر من خلال نهاية صغرى ثم تزداد بصورة مستمرة. لكن اذا كان الغاز فوق نقطة بويل فان قيمة  $Z$  تزداد بصورة حادة مع ازدياد الضغط وتصبح اكثر من واحد.

مثال (1)

وجد ان معامل الانضغاطية لغاز النيتروجين بدرجة  $(-50^\circ\text{M})$  وضغط (800 جو) يبلغ  $(Z=1.95)$  ويصبح (1.1) عند درجة حرارة  $100^\circ\text{M}$  وضغط (200 م). كما ان حجم كتلة معلومة من غاز النيتروجين تساوي لترا واحدا عند درجة حرارة  $(50^\circ\text{M})$  وضغط (80 جو). احسب حجم نفس الكتلة من غاز النيتروجين عند

(100 م) وضغط (200 جو).

الحل

$$Z_1 = \frac{P_1 V_1}{nRT_1}$$

وعند تغير درجة الحرارة الى  $T_2$  عندما يكون حجم الغاز  $V_2$  وضغطه  $P_2$  فإن

$$Z_2 = \frac{P_2 V_2}{nRT_2}$$

ومن المعادلتين اعلاه فإن:

$$n = \frac{P_1 V_1}{RT_1 Z_1} = \frac{P_2 V_2}{RT_2 Z_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} \cdot \frac{Z_2 T_2}{Z_1 T_1} = \frac{800 \times 1.00 \times 1.10 \times 373.20}{200 \times 1.95 \times 223.2}$$

$$V_2 = 3.77 \text{ لتر}$$

حجم كتلة التروجين

## 6-5 معادلة فان ديرفال Van Der Waals Theory

وضع العالم الهولندي فان ديرفال عام 1873 م معادلة سميت بأسمه لتطوير معادلة الغاز المثالي بحيث تنطبق على كافة الغازات عند ضغط ودرجة حرارة معينة. ومن المعلوم ان الغازات يمكن تكثيفها وتحويلها الى سائل اذا تعرض الغاز الى تبريد وضغط عال، عند هذه الحدود تصبح كافة الغازات غير مثالية.

وتستند معادلة فان ديرفال على مراعاة عامل تصحيح الحجم المحدد من الجزيئات وعامل تصحيح قوى الجذب بين جزيئات الغاز، وكما يلي:

## 1 - تصحيح الحجم المحدود من جزيئات الغاز

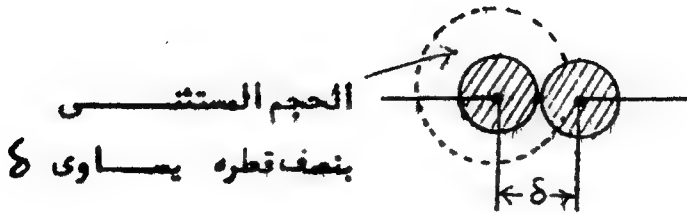
نعلم ان جزيئات الغاز تمتلك حجما معلوما تشغله، وان الحيز الذي تتحرك فيه جزيئات الغاز يكون اقل من الحجم الكلي بمقدار حجم هذه الجزيئات وعند ذلك يكون حجم الغاز المثالي مساو الى حجم الغاز الكلي مطروحا منه حجم جزيئات الغاز.

ولنفرض ان حجم جزيئات مول واحد من الغاز يساوي (b) عندئذ يكون الحجم المشغول بالمولات (n) من جزيئات الغاز هو (nb)، وهذا يعرف بالحجم المستثنى (excluded Volume). وبذلك يكون حجم الغاز المثالي مساويا الى  $(V_1)$ ، حيث ان:

$$V_1 = (V - nb) \quad \dots\dots\dots(5-15)$$

ويجب الانتباه الى ان العامل (b) لايساوي الحجم الحقيقي للجزيئات ولكنه يساوي اربعة اضعاف. ومن السهولة ملاحظة ذلك بفرض ان جزيئين من الغاز في حالة تماس بحيث ان المسافة بين مركزيهما يساوي  $(\delta)$  كما مبين في الشكل (6-5) التالي.

حيث  $r$  = نصف قطر الجزيئة  
 $2r = \delta$



الشكل (6-5) الحجم المستثنى لزوج من الجزيئات الصلدة



وعليه يكون الحجم المستثنى لكل زوج من الجزيئات يساوي:

$$= \frac{4}{3} \pi (2r)^3 = 8 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \dots\dots\dots(5-16)$$

ويكون الحجم المستثنى للجزيئة الواحدة نصف المقدار في المعادلة اعلاه  
ولذلك فإن:

$$\text{الحجم المستثنى للجزيئة الواحدة} = \frac{1}{2} \times 8 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) = 4 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \dots\dots\dots(5-17)$$

أو أن:

$$\text{الحجم المستثنى للجزيئة الواحد} = 4V_m \dots\dots\dots(5-18)$$

حيث  $V_m =$  حجم الجزيئة الواحدة من جزيئات الغاز.

## 2 - تصحيح قوى الجذب بين الجزيئات

تكون محصلة قوى الجذب على الجزيئات الداخلية للغاز تساوي صفراً، وذلك لوجود قوى جذب على هذه الجزيئة من جميع الاتجاهات. ولكن قوى الجذب تختلف بالنسبة للجزيئات القريبة من جدار الاناء الذي يحل فيه الغاز، لذلك تعاني جزيئات الغاز القريبة من الجدار من قوى تسحبها الى الداخل مؤدية الى خفض قوة اصطدام الجزيئة بجدار الاناء. وبناء على ذلك فان الضغط المقاس:  
(P) يكون اقل من الضغط المثالي  $P_i$  بالمقدار الذي نفرض انه يساوي P لذلك

$$P = P_i - P'$$

أو أن

$$P_i = P + P' \dots\dots\dots(5-19)$$

وبعبارة اخرى يكون من الضروري اضافة حد تصحيح الى الضغط الحقيقي للحصول على الضغط المثالي:

ان قوة الجذب المسلطة على الجزيئة التي تصطدم بالجدار تتناسب طرديا مع عدد الجزيئات لكل وحدة حجم في الغاز.

اذا كان عدد مولات الغاز يساوي  $n$  وكان الحجم يساوي  $V$ ، لذلك يتناسب  $(P)$  طرديا مع  $(n^2/V^2)$  بمعنى آخر:

لن

$$p' = \frac{n^2 a}{V^2}$$

$a$  = ثابت التناسب

وعليه يكون مقدار الضغط المثالي  $P$  مساويا الى :

$$P_i = P + \frac{n^2 a}{V^2} \quad \text{.....(5-20)}$$

ومن تعويض عامل التصحيح للحجم كما في المعادلة (5-5) وعامل التصحيح لقوى الجذب في المعادلة (5-20) نحصل على معادلة فان ديرفال التالية:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right) (V - nb) = nRT \quad \text{.....(5-21)}$$

حيث  $(a$  و  $b)$  ثابتان يطلق عليهما بثابتي فان ديرفال ويعتمدان على نوع الغاز والوحدات التي يعبر فيها عن الحجم وضغط الغاز.

مثال (2)

احسب الضغط المسلط بواسطة مول واحد من غاز ثاني اوكسيد الكربون الذي حجمه نصف لتر بدرجة  $25^\circ\text{C}$  بواسطة: أ — معادلة الحالة العامة للغازات المثالية. ب — بواسطة معادلة فان ديرفال. علما ان  $a = 3.592 \text{ atm} \cdot \text{mole}^{-2}$   $b = 0.04267 \text{ mole}^{-1}$

## الحل

( أ ) باستعمال معادلة الحالة العامة للغاز المثالي :  $PV = nRT$

$$P = \frac{RT}{V} = \frac{(0.082 \text{ l atm k}^{-1} \text{ mol}^{-1})(298 \text{ k})}{(0.500 \text{ liter mole}^{-1})}$$

$$P = 48.9 \text{ atm. ( جو )}$$

(ب) باستعمال معادلة فان ديرفال فان :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$$

$$P = \frac{(0.082) (298)}{(0.500 - 0.04267)} - \frac{3.592}{(0.500)^2}$$

$$= 53.5 - 14.3 = 39.2 \text{ atm. ( جو )}$$

ومن معادلة فان ديرفال، وعندما يكون الحجم المولي  $V$  كبيرا، فان الثابت (b) والمقدار  $(a/V^2)$  يصبحان ذا قيمتان صغيرتان جدا، وبذلك تختزل المعادلة الى مايشابه لمعادلة الحالة العامة للغازات المثالية  $PV = RT$ .

ويمكن ملاحظة قيم الثوابت  $a$  و  $b$  من خلال الجدول (5-1) حيث يمكن حساب هذه الثوابت من القياسات التجريبية لـ  $P$  و  $V$  ودرجة الحرارة  $T$  أو من خلال الثوابت الحرجة والذي سوف يتم توضيحها لاحقا.

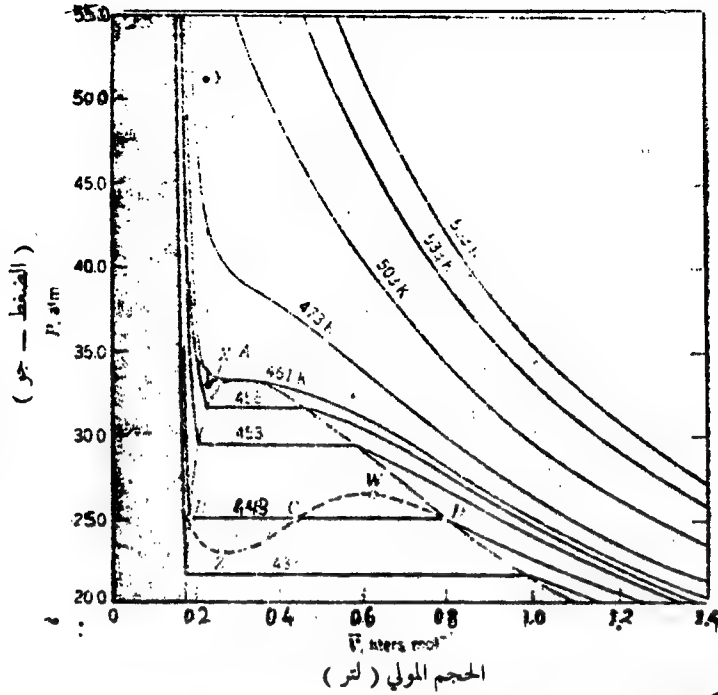
ان نجاح معادلة فان ديرفال في معالجة تغيرات الضغط، الحجم، درجة الحرارة للغازات الحقيقية يكون في اختيار الثابتين  $a$  و  $b$  لكل غاز وعند كل درجة حرارة بحيث تحدث تطابقا ملموسا مع النتائج المختبرية لهذه الغازات.

وبالرغم من عدم وجود تطابق تام للقيم المحسوبة والملاحظة تجريبيا لحجوم الغازات الحقيقية عند مدى واسع من الضغوط فان معادلة فان ديرفال تبقى ذات فائدة كبيرة في التعويض عند عدم مثالية كثير من الغازات عند حساب حجومها بتغير الضغط أو درجة الحرارة. ونلاحظ من الشكل (5-7) مدى النجاح في تطبيق المعادلة ذلك من تغيرات PVT التي هي احسن بكثير من النتائج المتوقعة من أية

Gas	a Liter atm.mol <sup>-2</sup>	b Liter.mol <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub>	0.2444	0.02661
He	0.03412	0.02370
N <sub>2</sub>	1.390	0.03913
O <sub>2</sub>	1.360	0.03183
Cl <sub>2</sub>	6.93	0.05622
NO	1.340	0.02789
NO <sub>2</sub>	5.284	0.04424
H <sub>2</sub> O	5.464	0.03049
CH <sub>4</sub>	2.253	0.04278
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5.489	0.06380
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	8.664	0.08445
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (n)	14.47	0.1226
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (n)	12.87	0.1142
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (n)	19.01	0.1460
CO	1.485	0.03985
CO <sub>2</sub>	3.592	0.04267

الجدول (1-5) ثوابت فان ديرفال

معادلة اخرى. ان تصرفات منطقة الطورين كما في الشكل ادناه لا يمكن متابعتها من خلال معادلة فان ديرفال وان المنطقة العظمى والمنطقة الصغرى يجب اهمالهما.



الشكل (7-5): يمثل ايسوثرم الايسوثيرم الذي يوضح المنطقة الحرجة.

## 7-5 معادلة فان ديرفال والنقطة الحرجة

نلاحظ من الشكل (7-5) أن معادلة فان ديرفال تتبع سلوك غاز ما بالقرب من منطقة اتزان « بخار — سائل » بطريقة جيدة، كما أن هنالك درجة حرارة واحدة يمكن عندها أن توضح معادلة فان ديرفال وثابتها (a و b) نقطة الانقلاب الأفقي والتي عند مطابقتها بالأيسوثرم الحرج (Critical Isotherm) ويعطي هذا التطابق طريقة مناسبة « على أغلب الحالات » للحصول على قيمتي الثابتين في معادلة فان ديرفال التالية:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right) (\bar{V} - nb) = nRT \quad \dots\dots\dots(5-22)$$

وبضرب حلود معادلة فان ديرفال اعلاه وترتيبها في القوى التنازلية من (V) نحصل على:

$$V^3 - V^2 \left(b + \frac{RT}{P}\right) + \bar{V} \frac{a}{P} - \frac{ab}{P} = 0 \quad \dots\dots\dots(5-23)$$

عندما تكون درجة الحرارة أوطأ من درجة الحرارة الحرجة فإن المعادلة اعلاه من الدرجة الثالثة (Cubic equation) ولها ثلاثة حلول حقيقية، كل قيمة يأخذها P تعطي ثلاث قيم من V. وهذه المعادلة ممثلة بخطوط متقطعة على المسار DWCZB بدرجة حرارة 440 K كما في الشكل (5-7) بينما القيم V الثلاث هي التقاطعات B و C و D على الخط الموازي الذي يمثل قيمة محدودة من الضغط.

يعطي هذا الخط المتقطع المحسوب حالة انتقالية مستمرة في الطور الغازي الى الطور السائل. ويتواجد كل من البخار والسائل على مسار الخطوط المتوازية كما في الشكل (5-7)، ان الخط المتقطع النظري DWCZB لا يمثل حالة فيزيائية معينة، وعلى سبيل المثال ان ميل المنحنى في النقطة C يكون موجبا وهذه حقيقة تقودنا الى حالة غير طبيعية وهي ان الزيادة في الضغط تقود الى زيادة الحجم. لذا يمكن ان نحصل على ضغط الغاز بحالة غير مستقرة كما هو ممثل في بداية الخط المتقطع DW. أي قبل حصول حالة الاسالة للغاز في حالة فوق التبريد (Supper Cooled gas) عند ذلك ينخفض الضغط الى الخط الموازي. كذلك من الممكن ايجاد سائل تحت ظروف غير مستقرة على طول الخط BZ. عند درجة حرارة 461 K التي تمثل درجة الحرارة الحرجة لسائل البنزين، توجد فقط قيمة واحدة للحجم ( $V_c$ ).

يمكن ايضا حساب ثابتي معادلة فان ديرفال من الثوابت الحرجة للغاز كما مبين في الشكل (5-7) حيث توجد نقطة انقلاب افقية في المنحنى الناتج من رسم V مقابل P في النقطة الحرجة بحيث ان  $(\partial P / \partial \bar{V})_T = 0$  صفرا وكذلك  $(\partial^2 P / \partial \bar{V}^2)_T = 0$  صفرا.

عند درجة الحرارة الحرجة (T) يمكن كتابة معادلة فان ديرفال كمايلي:

$$P = \frac{RTc}{\bar{V} - b} - \frac{a}{\bar{V}^2} \quad \dots\dots\dots(5-24)$$

وبتفاضل المعادلة (24-5) نسبة الى الحجم المولي فان:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \bar{V}}\right)_{Tc} = \frac{-RTc}{(\bar{V} - b)^2} + \frac{2a}{\bar{V}^3} \quad \dots\dots\dots(5-25)$$

وعند تفاضل المعادلة اعلاه بالنسبة الى الحجم المولي فا:

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial \bar{V}^2}\right)_{T_c} = \frac{2RT_c}{(\bar{V} - b)^3} - \frac{6a}{\bar{V}^4} \quad \text{.....(5-26)}$$

وبما ان كلا من المعادلتين (25-5) و (26-5) تساوي صفرا عند درجة الحرارة الحرجة، حيث يعوض بـ  $\bar{V}_c$  بدلا من  $\bar{V}$  و بـ  $P_c$  بدلا من  $P$ .

ومن حل المعادلات (24-5)، (25-5) و (26-5) رياضيا يمكن الحصول على قيم الثوابت ( $R$ ,  $b$ ,  $a$ ) بدلا من الضغط الحرج والحجم الحرج ودرجة الحرارة الحرجة وكالي:

$$a = 3P_c \bar{V}_c^2, b = \frac{\bar{V}_c}{3}, R = \frac{8P_c \bar{V}_c}{3T_c} \quad \text{.....(5-27)}$$

كما ان الثوابت الحرجة المصاغة بدلالة ثوابت معادلة فان ديرفال تكون كالآتي:

$$\bar{V}_c = 3b, P_c = \frac{a}{27b^2}, T_c = \frac{18a}{27bR} \quad \text{.....(5-28)}$$

وطبقا للمعادلة (33-5) فان جميع غازات فان ديرفال لها عامل انضغاط  $P_c \bar{V}_c / RT_c$  عند النقطة الحرجة مساو الى  $\frac{3}{8} = 0.375$ ، ان عوامل الانضغاطية عند

النقطة الحرجة لعدد من الغازات قد ادرج في الجدول (1-5)

وعند تعويض القيم من معادلة (27-5) في معادلة (24-5) نحصل على

المعادلة التالية

$$\frac{P}{P_c} + \frac{3\bar{V}_c^2}{\bar{V}} \left( \frac{\bar{V}}{\bar{V}_c} - \frac{1}{3} \right) = \frac{8}{3} \frac{T}{T_c} \quad \text{.....(5-29)}$$

تعرف نسب متغيرات الحالة الى نظيراتها في الحالة الحرجة بالمتغيرات

المختزلة كما هو مبين في ادناه:

$$P_r = \frac{P}{P_c}, \bar{V}_r = \frac{\bar{V}}{\bar{V}_c}, T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{.....(5-30)}$$

حيث  $T_r$  و  $V_r, P_r$  يمثلون الضغط المختزل والحجم المختزل ودرجة الحرارة المختزلة على التوالي.

وعند الافادة من القيم المختزلة في المعادلة (5-30) وتعويضها في المعادلة (5-29) نحصل على المعادلة التالية:

$$(P_r + \frac{3}{2V_r}) (\bar{V}_r - \frac{1}{3}) = \frac{8}{3} T_r \quad \dots\dots\dots(5-31)$$

وبذلك فان كل الثوابت المرتبطة بالخواص الذاتية للغاز سوف تختفي، كما ان المعادلة (5-31) لا تمثل القيم العملية بصورة احسن مما جاءت به معادلة فان ديرفال الاصلية ولكنها تقود الى الفكرة التي تنص على ان المواد المختلفة التي لها قيم متساوية لدرجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج والحجم الحرج، فانها حقا تكون موادا متشابهة.

مثال (3)

اذا كانت قيمتا ثابتي فان ديرفال لغاز الميثان هما  $a=0.229$  نيوتن - متر<sup>4</sup> / مول<sup>2</sup> و  $b=4.28 \times 10^{-5}$  متر<sup>3</sup> / مول على التوالي، جد الحجم الحرج والضغط الحرج ودرجة الحرارة الحرجة لغاز الميثان؟

الحل

نجد الحجم الحرج  $V_c$ :

$$V_c = 3b$$

$$= 3 \times 4.28 \times 10^{-5} = 12.84 \times 10^{-5} \text{ متر}^3 / \text{مول}$$

ونجد الضغط الحرج  $P_c$ :

$$P_c = \frac{a}{27b^2}$$

$$P_c = \frac{0.229}{27(12.84 \times 10^{-5})^2}$$

$$= 46.4 \times 10^5 \text{ نيوتن} / \text{متر}^2$$



ونجد درجة الحرارة  $T_c$ :

$$T_c = \frac{8a}{27Rb}$$
$$= \frac{8 \times 0.229}{27 \times 8.3 \times 12.84 \times 10^{-5}}$$

$$T_c = 191 \text{ K (درجة مطلقة)}$$

مثال (4)

وجد ان مولا واحدا من غاز ثاني اوكسيد الكربون يشغل حيزا قدره 0.382 لترا في درجة حرارة  $40^\circ\text{C}$  وتحت ضغط قدره (50 جو). احسب مقدار الضغط الذي يمكن تسليطه وذلك باستعمال: ( أ ) القانون العام للغازات المثالية. (ب) قانون فاندرفالز علما ان قيم  $a$  و  $b$  هي  $3.6 \text{ liter}^2\text{atm}$  و  $0.0428 \text{ liter}$  على التوالي.

الحل

( أ ) القانون العام للغازات المثالية:

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{0.082 \times 313}{0.382} = 67.2 \quad (\text{جو})$$

(ب) قانون فاندرفالز:

$$P = \frac{\bar{R}\bar{T}}{\bar{V} - b} - \frac{a}{\bar{V}^2}$$

$$P = \frac{0.082 \times 313}{(0.382 - 0.0428)} - \frac{3.6}{(0.382)^2}$$

$$P = 50.9 \quad (\text{جو})$$

مثال (5)

إذا علمت ان درجة الحرارة الحرجة لغاز  $\text{CO}_2$  هي 300 مط وكثافته الحرجة (0.45 غم/سم<sup>3</sup>) ، فما هي ثوابت معادلة فاندرفالز  $a, b$ ؟

الحل

نعلم ان حجم الغاز الحرج يساوي:

$$V_c = \frac{\text{الوزن الجزيئي}}{\text{الكثافة الحرجة}} = \frac{44}{0.45 \times 10^3} \text{ لتر}$$

لكن الحجم الحرج  $V_c$  يرتبط بالثابت  $b$  ، كما في المعادلة التالية:

$$P_c = \frac{RT_c}{8b} = \frac{0.0821 \times 300}{8 \times 3.26 \times 10^{-2}}$$

$$P_c = 94.43 \text{ جو}$$

أما الثابت  $a$  فيتم إيجاده من المعادلة التالية:

$$a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \\ = \frac{27 \times (0.0821)^2 \times (300)^2}{64 \times 94.43} \\ a = 2.71 \text{ جو لتر}^2 / \text{مول}^{-2}$$

### 8-5 معادلة كلايرون The Clapeyron Equation

تتميز معظم المواد الموجودة في الطبيعة سواءً كانت عنصر أم مركبا بوجود اطوار لها ( صلب وسائل وغاز ) ، ويعتمد ذلك على مؤثرات فيزيائية واخرى كأرتفاع درجة الحرارة والضغط وقوى التجاذب والتنافر . ومن هذا المنطلق جاهد العلماء في

دراسة اعماق هذه الخواص وعلاقتها بأطوار المادة، فوجدوا أطوار المادة، ثم درسوا خاصية التوازن اذا كانت متوفرة بين هذه الأطوار.

وكان من بين الدارسين لأطوار المادة وتوازناتها، العالم كلايرون الذي افترض وجود كمية من سائل في حالة اتزان مع بخاره بدرجة  $T$  وضغط مساو الى الضغط البخاري ( $P$ ) عند درجة الحرارة هذه، وبما ان الطورين السائل ( ) والبخاري ( $v$ ) في حالة اتزان فان الجهد الكيميائي للطورين يكون متساويا وكذلك طاقة كبس الحرة المولية الجزئية للطورين، اي ان:

$$G_l = G_v \quad \text{.....(5-32)}$$

اذا تم رفع درجة الحرارة الى  $(T + dT)$  فان الضغط البخاري سوف يزداد الى المقدار  $P + dP$  وذلك لكي يبقى الاتزان قائما بين الطورين، وبشكل  $dT$  و  $dP$  التغيرات المنتهية الصفر في درجة الحرارة والضغط على التوالي عند هذه الظروف فان:

$$G_l + dG_l = G_v + dG_v \quad \text{.....(5-33)}$$

ومن المعادلتين اعلاه نحصل على المعادلة التالية:

$$dG_l = dG_v \quad \text{.....(5-34)}$$

وحيث ان التغير في الطاقة الحرة يساوي:

$$dG = VdP - SdT \quad \text{.....(5-35)}$$

لذلك تصبح المعادلة (5-34) كالآتي:

$$V_l dp - S_l dT = V_v dp - S_v dT \quad \text{.....(5-36)}$$

ومن ترتيب المعادلة اعلاه نحصل على المعادلة:

$$(V_v - V_l) dp = (S_v - S_l) dT \quad \text{.....(5-37)}$$

ولما كان المقدار  $\Delta S = (S_v - S_l)$  ، وان التغير في انتروبية التبخير العكوسة تساوي:

$$\Delta S = \frac{\Delta H_v}{T} \quad \text{.....(5-38)}$$

ومن تعويض المعادلة (5-38) في المعادلة (5-37) وترتيب المعادلة الناتجة

على مايلي:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T(V_v - V_l)}$$

أو أن:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta \bar{H}}{T \Delta \bar{V}} \quad \text{.....(5-39)}$$

حيث أن  $(\Delta H)$  الإنشائية المولية في  $\Delta \bar{V}$  التغير في الحجم المولي. وتسمى المعادلة (5-39) بمعادلة كلايرون.

تطبق معادلة كلايرون على حالات التبخير والتسامي والانصهار والانتقال بين طورين صليين لمادة نقية. ومن الجدير بالذكر أن حرارة التسامي تساوي مجموع حرارة الانصهار وحرارة التبخير وكأيلي:

$$\Delta \bar{H}_{sub} = \Delta \bar{H}_{fus} + \Delta \bar{H}_{vap} \quad \text{.....(5-40)}$$

حيث أن حرارة التبخير ثابتة سواء تم إيجادها عن طريق التبخير المباشر أو عن طريق انصهار المادة الصلبة وتبخرها.

مثال (6)

جد الحجم المولي لبخار الماء، إذا كانت درجة غليان الماء عند ضغط جوى واحد تساوي  $(100^\circ \text{م})$ ، وأن حرارة تبخير الماء تساوي  $539.7$  سعره لكل غرام من الماء وأن  $(dP/dT) = 27.1$  ملمتر زئبق لكل درجة مطلقة.

الحل:

من معادلة كلايرون فإن:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta \bar{H}_{vap}}{T(\bar{V}_v - \bar{V}_l)}$$

أو أن:

$$27.1 = \frac{(539.7)(18.02)(0.04129)}{(\Delta \bar{V}) (373)}$$

$$\Delta \bar{V} = 30.180 \text{ لتر. جو / سعة}$$

ولما كان الحجم المولي لسائل الماء هو 18.78 سم<sup>3</sup>، فإن الحجم المولي لبخار الماء يساوي:

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_v - \bar{V}_l$$

$$30.180 = \bar{V}_v - (18.78 \times 10^{-3}) \text{ (لتر/مول)}$$

$$\therefore \bar{V}_v = 30.199 \text{ لتر/مول}$$

مثال (7)

احسب حرارة تبخر الماء في درجة 100م° وان المقدار  $(dP/dT) = 2.717$  سم زئبق لكل درجة مطلقة. كما ان كثافة الماء وبخار الماء تساوي 0.962 لكل سم<sup>3</sup> و  $5.973 \times 10^4$  غرام لكل سم<sup>3</sup> على التوالي، علما ان التعجيل الارضي يساوي 981 سم / ثا<sup>2</sup>.

الحل

يمكن ايجاد حرارة تبخر سائل الماء بوحدات جول لكل غرام من الماء بالاستعانة بقانون كلايرون التالي:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{vap}}{T(\bar{V}_2 - \bar{V}_1)}$$

حيث ان  $\bar{V}_2, \bar{V}_1$  حجم المتر المكعب الواحد من الماء وبخاره على التوالي  $(dP/dT) = 2.717 \times 13.59 \times 981$  (سم زئبق/درجة) =  $2.717 \times 13.59 \times 981 \times 10^{-1}$  متر<sup>2</sup>. درجة =  $3679.311$  نيوتن / متر<sup>2</sup>. درجة

وترتيب معادلة كلاسيوس كلايرون:

$$\Delta H_{\text{vap}} = \frac{dP}{dT} T (V_2 - V_1)$$

$$\Delta H_{\text{vap}} = 3679.31 \times 373 \left( \frac{10^{-6}}{5.973 \times 10^{-4}} - \frac{10^{-6}}{0.962} \right)$$

$$\Delta H_{\text{vap}} = 2258 \text{ جول / غرام}$$

## 9-5 معادلة كلاسيوس كلايرون

### The Clausius Clapeyron Equation

في عمليتي التبخر والتسامي قام كلاسيوس بتبسيط معادلة كلايرون، حيث افترض ان البخار يطيع قانون الغازات المثالية، ثم اهمل حجم السائل ( $V_l$ ) مقارنة بحجم الماء ( $V_v$ )، حيث ان الحجم المولاري للماء بدرجة 100م يساوي 0.0188 لترا والحجم المولاري لبخار الماء عند نفس درجة الحرارة يساوي 30.2 لترا. وفيما يلي الاشتقاق الرياضي لمعادلة كلاسيوس كلايرون الحجم المولاري لبخار الماء

$$V_v = \frac{RT}{P} \quad \dots\dots\dots(5-41)$$

ومن تعويض المعادلة (5-41) في المعادلة (5-46) نحصل على العلاقة

التالية:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P \Delta H_{\text{vap}}}{RT^2} \quad \dots\dots\dots(5-42)$$

تطبق المعادلة (5-42) عند حدوث تغير قليل، فمن المناسب استع

المعادلة التالية:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{RT^2}{P \Delta H_{\text{vap}}} \quad \dots\dots\dots(5-43)$$

وبالامكان ترتيب المعادلة (5-43) لتصبح:

$$\frac{1}{dT} \times \frac{dP}{P} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT^2}$$

أو أن

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT^2} \quad \dots\dots\dots(5-44)$$

وبتكامل المعادلة (5-45) وبافتراض أن  $\Delta H_{\text{vap}}$  لا تعتمد على درجة الحرارة

$$\int d \ln P = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \int T^{-2} dT \quad \dots\dots\dots(5-45)$$

أو أن

$$\ln P = \frac{-\Delta H_{\text{vap}}}{RT} + C \quad \dots\dots\dots(5-46)$$

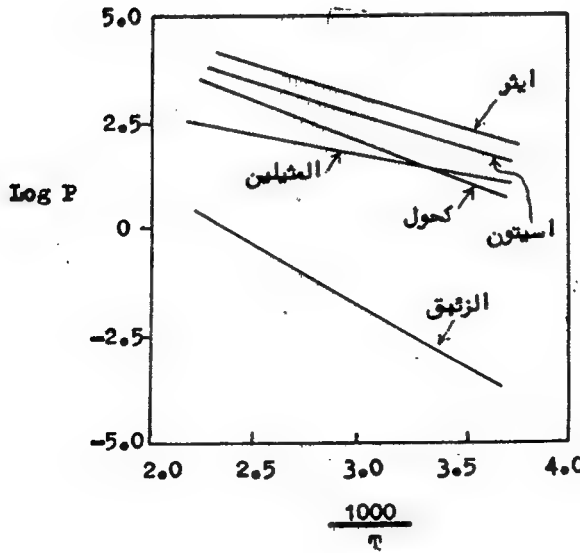
حيث  $C =$  ثابت التكامل ويمكن أن تكتب المعادلة (5-46) بالشكل

الثاني:

$$\log P = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{2.3 RT} + C \quad \dots\dots\dots(5-47)$$

واستعمال العلاقة (5-47) لرسم  $\log P$  مقابل  $1/T$  سوف نحصل على

خط مستقيم كما في الشكل (5-8) التالي:



وعند اخذ اللوغاريتم للأساس 10 فان ميل المنحني ( لاي منحني )

يساوي :

$$\text{Slope} = \frac{-\Delta H_{\text{vap}}}{2.3R} \quad \dots\dots\dots(5-48)$$

لذلك فان حرارة التبخير يمكن حسابها من المعادلة (5-48) كما يلي :  
 $\Delta H_{\text{vap}} = -(\text{Slope})(2.303)(1.987 \text{ Cal K}^{-1}) \text{ Mole}^{-1}$  ( سرعة لكل مول )

كما يمكن حساب حرارة التبخير او حرارة التسامي من تكامل المعادلة (52-5) بين الضغطين  $P_1$  ،  $P_2$  ودرجتين للحرارة  $T_1$  ،  $T_2$  كما يلي :

$$\int_{P_1}^{P_2} d \ln P = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \int_{T_1}^{T_2} T^{-2} dT \quad \dots\dots\dots(5-49)$$

$$\ln P_2 - \ln P_1 = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad \dots\dots\dots(5-50)$$

$$\log \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{2.303 R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right) \quad \dots\dots\dots(5-51)$$

ويجب ملاحظة ان التعويض في المعادلة اعلاه ، يجب ان تكون وحدات

$P_1$  ،  $P_2$  متساوية وتكون وحدات الثابت  $R$  نفس وحدات  $\Delta H_{\text{vap}}$

## 10-5 تطبيقات وامثلة على معادلة كلاسيوس — كلايرون

يتم تطبيق معادلة كلاسيون — كلايرون على عدة عمليات فيزيائية منها انصهار المادة الصلبة وتساميها وغليان السوائل ، وتحويل اشكال المادة الصلبة بين درجتين حراريتين وسوف نتطرق الى هذه الظواهر بالتفصيل :

( أ ) انصهار المواد الصلبة :

اذا فرضنا وجود مادة صلبة لها حجم مولي يساوي  $(V_s)$  بدرجة حرارة



(T) وعند تسخينها وانصهارها يصبح حجم هذه المادة المسالة ( $V_L$ ) عند درجة انصهارها الثابتة فان معاملة كلايرون سوف تكون كما يلي :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{fus.}}{T(V_L - V_s)}$$

تكون H موجبة دائماً لانصهار المادة الصلبة وان إشارة المقدار ( $dP/dT$ ) تعتمد على قيمة ( $V_L > V_s$ ) عندها تكون موجبة ، وتصبح سالبة في حالة ( $V_s > V_L$ ). وبذلك نستطيع تعيين الحرارة المولارية الكامنة للانصهار او تغير درجة انجماد الماء مع تغير الضغط ( $dT/dP$ ).

مثال 8 :

ينصهر الرصاص بدرجة 325 °م تحت ضغط جوي واحد. اوجد درجة الحرارة التي ينصهر فيها الرصاص عندما يكون الضغط المسلط ( 100 جو ) علماً ان الحجم المولاري للرصاص الصلب والرصاص المنصهر  $1.88 \times 10^{-5}$  متر<sup>3</sup>/مول  $1.944$  متر<sup>3</sup>/مول على التوالي ، وان  $H_{fus}$  تبلغ 22.38 جول/مول .

الحل

من معادلة كلايرون التالية :

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\Delta H_{fus.}}{T \Delta V}$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{22.38 \text{ J Mole}^{-1} \times 9.86288 \times 10^{-3} \text{ liter atm. J}^{-1}}{(598 \text{ K}) (1.9439812 \times 10^{-3} \text{ liter})}$$

$$\Delta T = 0.18987 \times 10^{-3}$$

الدرجة الحرارة التي ينصهر فيها الرصاص عندما يكون الضغط المسلط 100 جو تساوي (598.158987) مط .

## (ب) تسامي المواد الصلبة

في هذه الحالة يتم تحويل المواد الصلبة الى الحالة البخارية دون المرور بالحالة السائلة. وعندما يكون حجم البخار كبيراً جداً مقارنة بحجم المادة الصلبة التي يمكن اهمالها. وتستخدم بذلك المعادلة التالية:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T V_v}{\Delta H_{\text{sub}}} \quad \dots\dots\dots(5-52)$$

او تستخدم المعادلة التالية عند تغير الضغط وتغير درجة الحرارة:

$$\log \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{sub}}}{2.303 R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

ونورد المثال ادناه لتوضيح هذه الظاهرة.

### مثال 9

ان ضغط بخار اليود الصلب هو 6333 نيوتن للمتر المربع بدرجة 273 مط. جد ضغط بخار اليود عندما ترتفع درجة الحرارة الى 25 م° علماً ان حرارة التسامي لليود هي 61970 جول لكل مول؟

$$\begin{aligned} \log \frac{P_2}{P_1} &= \frac{\Delta H}{2.303 R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right) \\ \log \frac{6333}{P_1} &= \frac{61970}{2.303 \times 8.314} \left( \frac{298 - 273}{298 \times 273} \right) \\ P_1 &= 41.3 \end{aligned}$$

## (ج) تبخير السوائل عند درجة غليانها

في هذه الحالة يكون التغير في الحجم واضحاً، حيث ان حجم البخار الناتج اكبر بكثير من حجم السائل لنفس الكتلة من السائل، او بعبارة اخرى فان  $(V_v - V_l) \approx V_v$  وان  $V_v \approx V_v$  حجم البخار الذي ينتج من عملية غليان السائل.

## مثال 10

وجد ان الضغط البخاري لسائل البنزين يساوي  $0.153 \times 10^5$  نيوتن/متر مربع بدرجة حرارة 303 مط. واذا كانت حرارته تبخر سائل البنزين المولاري تساوي 34.2 كيلو جو/مول. جد الضغط البخاري لسائل البنزين عند درجة حرارة 333 مط.

## الحل

يتم تطبيق معادلة كلاسيون — كلايرون التالية :

$$\log \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{2.303 R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

$$\log \frac{P_2}{0.153 \times 10^5} = \frac{34200}{2.303 \times 8.314} \left( \frac{333 - 303}{333 \times 303} \right)$$

$$P_2 = 0.520 \times 10^5 \text{ نيوتن / مترمربع}$$

## ( د ) التحول بين اشكال المواد الصلبة

هنالك بعض المواد التي يمكن تواجدها في الطبيعة باكثر من شكل واحد مثلاً، الكربون والكبريت والفسفور وكلوريد الامونيوم، حيث يكون شكلان للكبريت هما الشكل المعيني والشكل المشوري، وتكون التحولات بين هذه الاشكال مصحوبة بتغير الحرارة. وتكون صغيرة جداً في اغلب الحالات مع ثبوت كثافة اشكال المادة الصلبة وتقارب حجمها المولارية.

## مثال (11)

يتم تحول القصدير الرمادي الابيض بامتصاص 2226 جول لكل مول بدرجة 273 مط، وضغط  $10^5$  نيوتن للمتر المربع. اذا كان الحجم المولاري للقصدير الابيض  $2.052 \times 10^{-5}$  متر مكعب لكل مول ويكون الحجم المولاري للقصدير

الرمادي  $1.814 \times 10^{-5}$  متر مكعب لكل مول . احسب درجة حرارة التحول عندما يصبح الضغط المسلط  $2 \times 10^{-6}$  نيوتن لكل متر مربع .

الحل

من معادلة كلايرون :

$$dT = \frac{(dP) T (V_2 - V_1)}{\Delta H}$$

حيث  $V_2$  = حجم القصدير الأبيض  
 $V_1$  = حجم القصدير الرمادي

$$dT = \frac{(2 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}) \times 273 \times (2.052 - 1.814) \times 10^{-5}}{2226}$$

$$dT = 0.56 = T_2 - T_1 = T_2 - 273$$

$$T_2 = 273.65$$

### 11-5 انتروبي التبخير « قاعدة تروتون »

#### Entropy of Vaporization «Trouton's Rule»

تكون انتروبيه تبخير كثير من السوائل عند درجة غليانها القياسية ( درجة غليان السائل عندما يكون الضغط واحد جو ) كمية ثابتة مساوية الى 21.0 سرعة تقريباً لكل درجة مول ، او 88.0 جول درجة . مول .

$$\Delta \delta_{\text{vap}} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T_b} \approx 21 \text{ ( سرعة / درجة . مول )} \dots\dots\dots (5-53)$$

$$\approx 88 \text{ ( جول / درجة . مول )}$$

ان هذه القاعدة تسمى بقاعدة تروتون ولها فائدة واضحة في تعيين وإيجاد حرارة تبخر السائل المولارية الذي له درجة غليان معلومة .

ان الثبوت النسبي لانتروبي التبخر من سائل لآخر يفسر عادة بواسطة فرضية بولتزمان التي تفسر زيادة الانتروبي بزيادة الملائنظام في المجموعة كما ان التحول

من سائل الى حالة البخار تقود الى زيادة اللاتنظام ولهذا فان انتروبية التبخر عند النقطة الحرجة تساوي صفراً بسبب عدم التميز بين السائل وبخاره وان الانثالية تساوي صفراً.

ان اغلب السوائل تسلك سلوكاً متشابهاً ليس فقط عند درجة حرارتها الحرجة ولكن عند كسور متساوية من درجة حرارتها الحرجة ايضاً. وقد تم ايجاد قيم لدرجة الغليان القياسية لسوائل عديدة وبالتقريب فانها تساوي كسوراً متساوية من درجة حرارتها الحرجة. ولجل ذلك فان سوائل مختلفة يجب ان تكون لها نفس انتروبية التبخر عند درجة غليانها اخذين بنظر الاعتبار عدم حصول حالات تجمع او تفكك لجزيئات السائل خلال عملية التبخر.

اما بالنسبة الى سائل الماء والكحول والتي تكون اواصر هيدروجينية بين جزيئات السائل، فان انتروبي التبخير تكون اكبر من ( 21 سعة/درجة. مول ) كذلك فان  $H_2$  و  $He$  واللذان يغليان بدرجة اعلى قليلاً من الصفر المطلق فتشذ كثيراً ايضاً عن هذه القاعدة. اما حامض الخليك وحامض الكاربوكسيل فلهما انتروبية اوطأ بسبب ان البخار يتكون من الثنائيات الجزيئية، ولا تزال بحاجة الى طاقة اضافية لكسر التآصر بين هاتين الجزيئتين الى جزيئات منفردة كما هو الحال في بقية الابخرة والغازات.

وعليه فان قاعدة تروثون تستعمل في حالة السوائل غير المستقطبة في عملية تعيين ضغطها البخاري عند درجة غليانها القياسية المعلومة.

#### مثال (12)

وجد ان درجة غليان سائل الهكسان n - Hexane تساوي 69 م°، جد:

( أ ) حرارة التبخير.

(ب) الضغط البخاري عند درجة 60 م°.

الحل

$$\Delta H_{\text{vap}} \approx \Delta \delta_{\text{vap}} \cdot T_b$$

$$\approx (21) (342)$$

$$\approx 7190$$

$$\log \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H}{2.303} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

$$\log \frac{760}{P_1} = \frac{7190}{2.303 \times 1.987} \left( \frac{9}{333 \times 342} \right)$$

$$P_1 = 571 \text{ ملليمتر زئبق}$$

علماً أنه وجد ان الضغط البخاري لسائل الهكسان المستخرج من القيم العملية يساوي 555.9 ملليمتر زئبق .

### اسئلة الفصل الخامس

- 1 — يتغير بخار مسائل الاستونترايل بمعدل 0.03 جو/درجة قرب درجة غليانه الاعتيادية المساوية الى 80 م°. احسب حرارة تبخره .  
( الجواب : 7.4 كيلو سرعة/مول )
- 2 — يبلغ تغير انتروبي انصهار مادة معينة ( 3 سرعة/درجة . معدل ) وان درجة الانصهار تحت ضغط جوي واحد ( 6 م° ) . وتبلغ كثافات الصلب والسائل 0.90 و 0.85 غم/سم<sup>3</sup> على التوالي . احسب درجة الانصهار تحت ضغط 10<sup>4</sup> جو . ( الجواب ( -4.9 ) م° ) .
- 3 — ان ضغط غاز الايثانول هو 135.5 ملم عند 40 م° و 542.5 ملم عند درجة حرارة 70 م° :  
( أ ) احسب حرارة التبخير المولارية . (ب) احسب ضغط بخار الايثانول اذا كانت درجة الحرارة 25 م° ؟ الجواب :  
( أ )  $H = 9877$  سرعة / مول . درجة  
(ب) 221.2 ملم زئبق .
- 4 — احسب ثوابت فان ديرفالز للغاز الخاضع لهذه المعادلة اذا كانت درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج للغاز 31 م° و 72.8 جو على التوالي ، علماً ان  $R = 0.082$  لتر . جو/درجة . مول ؟

( الجواب ) :

( أ ) 3.606 لتر<sup>-2</sup> جول مول

( ب ) 42.83 سم<sup>3</sup>/مول

5 — برهن ان للغاز الخاضع لمعادلة فان ديرفالز  $RT_c/P_c V_c = 8/3$  حيث ان  $R =$  ثابت الغاز و  $T_c$ ،  $P_c$ ،  $V_c$  درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج والحجم الحرج للغاز على التوالي، الى اي مدى يخضع الغاز الحقيقي لمعادلة فان ديرفالز؟

6 — يشغل مول واحد من غاز CO حجماً قدره 1.5 لتراً عند درجة حرارة 27 م° اذا علمت ان قيم a و b تساوي ( جول لتر<sup>2</sup> — 2 مول<sup>-2</sup> 1.05 ) و 0.04 لتر . مول على التوالي :

( أ ) جد ضغط ذلك الغاز باستخدام معادلة فان ديرفال .

( ب ) اذا كان ثابت فان ديرفالز (b) لغاز الاوكسجين = 0.0318 لتر مول<sup>-1</sup>، احسب قطر جزيئة الاوكسجين ؟

( الجواب  $2.934 \times 10^{-8}$  سم )

7 — احسب الحجم الذي يشغله كيلو غرام واحد وزناً من غاز CO<sub>2</sub> بدرجة 100 م° وضغط 50 جو باستعمال :

( أ ) معادلة الغاز المثالي .

( ب ) لائحة هيجن — واتسن — ويبجتر .

( الجواب ) :

( أ ) 13.9 لتر .

( ب ) 12.2 لتر .

8 — وضع 1.234 غم من غاز مثالي في اناء مغلق حجمه 550 سم<sup>3</sup> وله ضغط 2.0 جو بدرجة حرارة 20 م°. ماهو وزن الغاز في الاناء عندما يكون ضغط الغاز 0.8 جو بدرجة حرارة 5 م° .

( الجواب 0.520 غم )

9 — وجد ان نسبة الحجم المولي لغاز الهيليوم تحت ضغط ( 100 جو ) ودرجة حرارة الصفر المتقوي يساوي 0.011075 الى الحجم المولي عند ضغط جوي واحد ودرجة حرارة الصفر المتقوي . احسب قطر ذرة الهيليوم .

( الجواب  $1.34 \times 10^{-8}$  سم ) .

10 — اذا كان مقدار معامل الانضغاط للهواء يبلغ (1.0) عند درجة حرارة 273.15 مط وضغط جوي قدره ( 101325 نيوتن للمتر المربع ) بينما تكون قيمته 1.3951 عند درجة حرارة 373.15 مط وضغط ( 10.1325 ميكانيوتن للمتر المربع ) فاذا سخنت كمية من الهواء تشغل حجماً مقداره ( 10 لتر ) في درجة حرارة 273.15 مط وضغطاً يبلغ ( 101325 نيوتن للمتر المربع )، ثم ضغطت هذه الكمية حتى اصبحت درجة حرارتها 373.15 كلفن، وضغطها ( 10.1325 ميكانيوتن للمتر المربع ). احسب الحجم النهائي للهواء ثم قارنه بالقيمة المستخرجة من قوانين الغازات المثالية.

( الجواب ) :

$$( أ ) V_2 = 0.1906 \text{ لتر} .$$

$$( ب ) 0.1366 \text{ لتر} .$$

11 — ان ضغط بخار الاثيلين يتغير بتغير درجة الحرارة كما هو مبين في الجدول ادناه :

T مط	175	173	136	153
PNm <sup>-2</sup>	139200	124900	93990	69060

جد الحرارة الكامنة لتبخير الاثيلين بيانياً .

( الجواب 13439 جول لكل درجة لكل مول )

12 — جد الضغط الذي يسلطه عمود من الزئبق ارتفاعه 76 سم بوحدات نيوتن لكل متر مربع، علماً ان التعجيل الارضي 9.80665 متر<sup>2</sup> ثا وان كثافة الزئبق 13.595 غم/سم<sup>3</sup> بدرجة الصفر المئوي ؟

( الجواب 101.325 نيوتن لكل متر مربع )

13 — لغاز البروين القيم التالية لضغطه البخاري :

T مط	150	200	250	300
P تور	382	198	2074	10040

جد من النتائج ( أ ) حرارة تبخره ( ب ) الضغط البخاري بدرجة 225 كلفن وبواسطة الرسم البياني ؟

( الجواب )

$$( أ ) 4670 \text{ سرعة/مول} .$$



(ب) 741 تور .

14 — وجد ان حرارة تبخر سائل الايثر 88.39 سعرة لكل غرام عند درجة غليان السائل بدرجة 34.5°م ( أ ) احسب معدل تغير الضغط البخاري مع تغير درجة الحرارة  $dP/dT$  عند درجة غليان الايثر . (ب) جد درجة غليان سائل الايثر عند ضغط 750 تور . (ج) جد الضغط البخاري للسائل بدرجة حرارة 36.0°م ؟

( الجواب )

( أ ) 26.5 تور / كلفن

(ب) 34.1°م

(ج) 800 تور

# الفصل السادس

## LIQUIDS السوائل

### 1.6 المقدمة

من المعلوم ان السوائل تختلف عن الغازات من حيث طبيعة القوى بين الجزيئات ومتوسط المسار الحر، حيث ان قوى التماسك بين جزيئات السائل كبيرة جداً مقارنة بالغاز. كما ان قوى الجذب هذه تفوق الطاقة الحركية للجزيئات فلا تستطيع هذه الجزيئات ان تنفصل عن بعضها كثيراً الا اذا اعطيت طاقة اضافية تكفي للتغلب على عامل الجذب بينها، وغالباً ماتكون هذه الطاقة، طاقة حرارية تساعد على هروب الجزيئات من سطح السائل وحدث تبخر السائل.

وبسبب قوى الجذب الكبيرة بين جزيئات السائل، فإنه يأخذ شكل الاناء الذي يحل فيه، ولا يكون للضغط الخارجي تأثير واضح على حجم السائل مقارنة بتأثير الضغط على حجم الغاز، ولذلك يمكن القول ان انتظام الذرات بسبب قوى جذب الجزيئات فيما بينها في الحالة السائلة يمثل حالة وسطى مقارنة بانتظام الذرات او الجزيئات في الحالة الغازية والصلبة.

للسوائل خاصية ثبوت الحجم بغض النظر عن شكل الاناء الذي يوضح فيه، وبالعكس ماهو عليه في الغازات، كذلك تتصف باللزوجة وهذه الصفة تعتبر مقياساً للقوى العاملة التي تقاوم الجريان، الذي يحصل تحت وطأة الاجهاد الذي يسلط عليه ويحدث الجريان في السوائل بتحرك طبقة من السائل الى طبقة اخرى. كما للسوائل خاصية النفوذ والانتشار، وتشابه الى حد ما ما يحدث في حالة انتشار الغازات، حيث ان وضع قطره من الحبر في سائل يؤدي الى انتشاره في جميع ارجاء السائل، ولتعليل ذلك نقول ان جزيئات السائل تمتلك كمية من الطاقة الحركية التي تساعد على التحرك والاصطدام مع جزيئات السائل الاخرى.

كما ان جزيئات السائل القريبة من السطح، تستطيع الهروب من سطحه وتبخرها بصورة أسهل مما هو عليه في جزيئات السائل الاخرى، وهذا يؤدي الى تكوين ضغط ضغط لبخار السائل الذي يكون في حالة توازن مع السائل عند ثبوت درجة الحرارة. ولها ايضاً خاصية الانجذاب أو النفور من جدار الاناء وهذا يفسر حدوث الخاصية الشعرية.

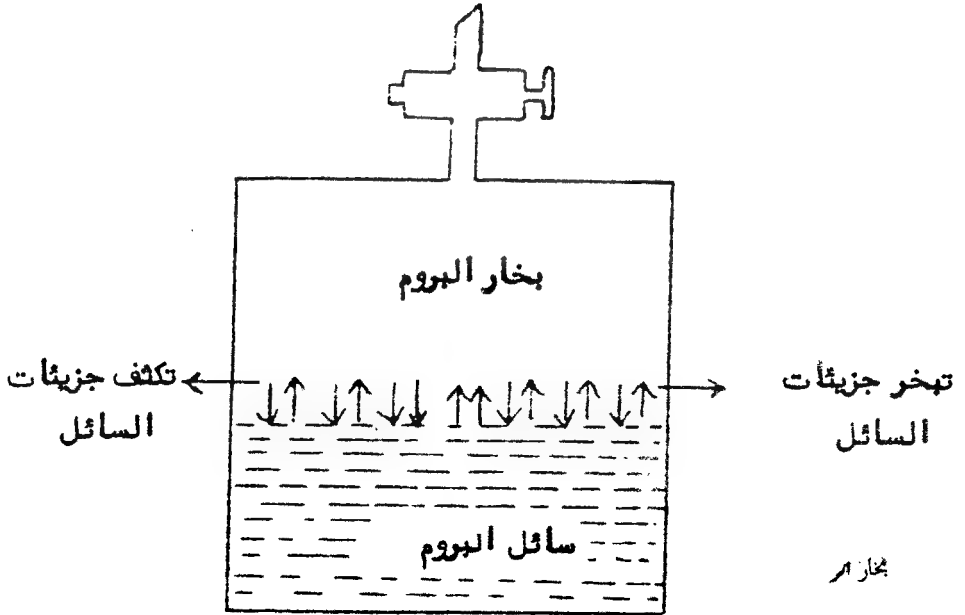
## 2-6 الضغط البخاري للسوائل Vapour Perssure of Liquids

اذا وضع سائل في اناء فسوف يتم تبخر جزء منه، وتستمر العملية حتى تحصل حالة توازن بين الجزيئات المتبخرة من سطح السائل والجزيئات المتكثفة اليه. وتحدث جزيئات الطور البخاري ضغطاً البخاري للسائل.

تفسر ظاهرة وجود ضغط بخاري للسائل وفق النظرية الحركية الجزيئية للغازات، التي تفترض ان جزيئات السائل في حالة حركة مستمرة، وتتحرك بسرعة مختلفة تشبه نسبياً حالة حركة جزيئات الطور الغازي. فبعض جزيئات السائل تمتلك طاقة حركية عالية بسبب اصطداماتها مع الجزيئات الاخرى فتستطيع التغلب على قوى جذب جزيئات السائل الاخرى المجاورة لها والهروب من سطح السائل لتسهم مع الجزيئات الاخرى في تكوين الضغط البخاري للسائل. وبما ان بعض الجزيئات المتبخرة الاخرى في تكوين الضغط البخاري للسائل. وبما ان بعض الجزيئات المتبخرة اثناء حركتها العالية ترتطم بسطح السائل وتعود اليه، وبذلك تحصل عملية التبخير والتكثيف حتى حصول حالة الاتزان، وبطبيعة الحال فإن حالة الاتزان لا تحصل مالم يتم تثبيت درجة حرارة السائل. على سبيل المثال ان الضغط البخاري للماء بدرجة 25 °م يساوي 23.76 ملم ويصبح 760 ملم عند درجة غليانه في 100.15 °م.

يعتمد الضغط البخار للسائل على عدة عوامل منها مايتعلق بطبيعة السائل وقوى الجذب بين جزيئاته، كذلك درجة الحرارة والضغط الاعتيادي، ومساحة سطح السائل. تكون عملية التبخر ماصة للحرارة ((Endothermic)) وتسهم الحرارة التي تعطى للسائل في زيادة الطاقة الحركية للجزيئات مؤدي الى

تبخرها، وتحصل هذه نتيجة تغلب الطاقة الحركية للجزيئة على القوة التي تربطها بالسائل. ويوضح الرسم ادناه (1-6) ضغط بخار سائل البروم بالجزء العلوي يمثل بخار البروم.



الشكل (1-6) : الضغط البخاري للسائل

عند وضع كمية من سائل البروم في اناء محكم السد تهرب بعض جزيئات البروم من سطح السائل لتكون بخاراً بني اللون سرعان ما ينتشر في الحيز العلوي من الاناء مشكلاً ضغطاً هو الضغط البخاري لسائل البروم.

### 3-6 طرق تعيين ضغط بخار السائل

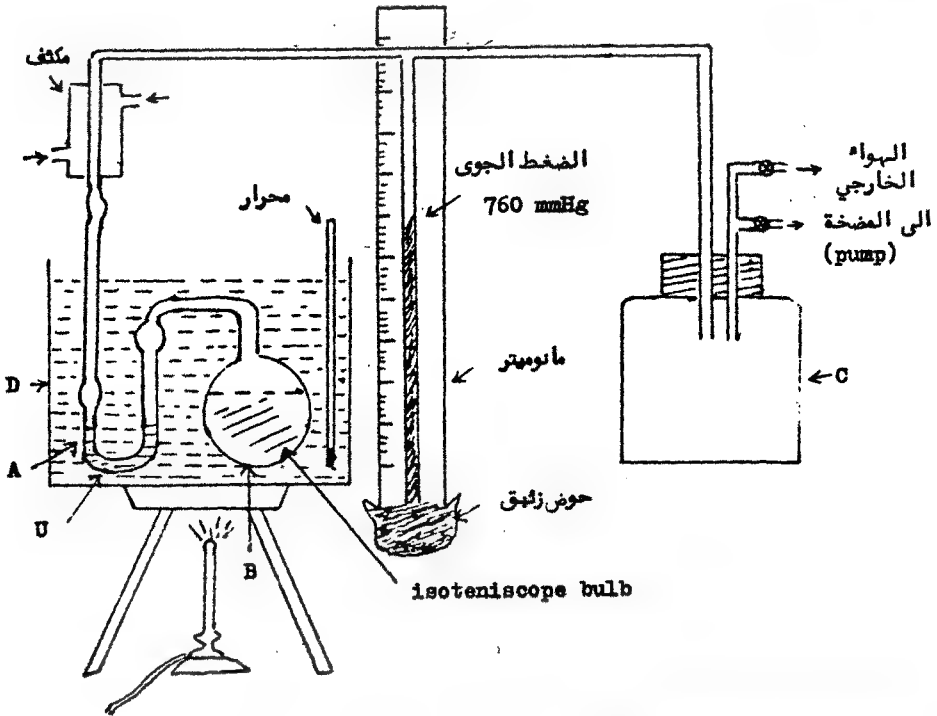
توجد ثلاثة انواع من طرق حساب ضغط بخار السائل وسوف نورد مثلاً واحداً لكل من الطرق الثلاث وكما يلي :

## 1 – الطرق الستاتيكية Static Method

من أنواع هذه الطريقة، (أ) الطريقة البارومترية، (ب) طريقة مقياس ضغط البخار للسوائل. وستتطرق الى شرح الطريقة الثانية فقط.

#### 4-6 طريقة قياس ضغط البخار للسائل

استنبطت هذه الطريقة من قبل العالمين سميث ومينزيرز (Smith & Menzies) عام 1910 م، وسمي الجهاز الذي استخدم في القياس بجهاز قياس ضغط بخار السائل وكما هو موضح في الرسم ( الشكل 2-6 ) .



الشكل (2-6): طريقة قياس ضغط بخار السوائل

لأجل قياس الضغط البخاري لسائل ما، يتم ملء بصلة الجهاز الى منتصفها بالسائل، حيث تكون مرتبطة بأنبوب على شكل حرف U وكما هو موضح بالشكل (2-6). ويحتوي هذا الأنبوب على السائل المستخدم بحيث ان مستوى سطح السائل في الأنبوبة U يصل الى نصف ذراعها.

يتم ربط الجهاز الى مانوميتر ودورق كبير منظم C، حيث يعمل هذا الدورق على تقليل تقلبات الضغط الى أقل مايمكن بمساعدة حجمها الكبير. كما ويستعمل حمام مائي لغمر القنينة والأنبوب U لغرض خفضها تحت درجة حرارة ثابتة يمكن التعرف عليها بواسطة المحرار المغمور في ماء الحمام.

يفرغ الجهاز بواسطة ربطه الى مفرغة ماصة وحتى يبدأ السائل في بصلة الجهاز بالغليان، حيث يطرد جميع الهواء من A الى B. يتم بعد ذلك غلق مفرغة الهواء الماصة، ثم ربط القنينة المنظمة الى الهواء وحتى يتم دخول الهواء الى اجزاء الجهاز لكي يتساوى مستوى سطح السائل في ذراعي الأنبوبة التي على شكل الحرف U، وبذلك يصبح الضغط في هذه الأنبوبة نفس الضغط في القنينة المنظمة، ويساوي الفرق بين الضغط في الباروميتر والارتفاع بعمود الزئبق في المانوميتر. وبنفس الطريقة يمكن قياس بخار السائل مع تغير درجات الحرارة، وذلك من رفع درجة حرارة الحمام المائي.

تتميز هذه الطريقة بدقة عالية اذا ماقورنت نتائجها مع الطريقة البارومترية.

## 2 — الطريقة الدينامية الحرارية Thermodynamic Method

تستخدم هذه الطريقة لقياس ضغط بخار السائل، بوضعه في جهاز الغليان، وتسخين السائل حتى غليانه تحت ضغط خارجي ثابت هو الضغط الجوي الاعتيادي. ونلاحظ درجة غليان السائل بواسطة المحرار لمنع حصول حالة التسخين الفائت للسائل (Supper heating) ولما كانت درجة غليان السائل تعرف بدرجة الحرارة التي عندها يصبح ضغط بخار السائل مساوياً الى الضغط الجوي ( 760 ملم زئبق ) الخارجي، ولما كان الضغط الخارجي معلوماً فيتم إيجاد ضغط بخار السائل.

### 3 — طريقة تشبع الغاز The Gas Saturation Method

تتضمن هذه الطريقة امرار غاز خامل مثل غاز الهليوم او غاز النيتروجين وحتى احياناً الهواء الجاف على شكل فقاعات خلال السائل عند درجة حرارة ثابتة وحتى الاشباع ببخار السائل. يتم بعد ذلك امتصاص البخار أو تكثيفه بطرق معينة، او يحلل البخار المكثف. ولما كان الضغط الكلي للغاز المشبع ببخار السائل هو ضغط البخار + ضغط الغاز الخامل  $P = P_1$ ، وان  $n_1$  = عدد مولات بخار السائل و  $n_2$  = عدد مولات الغاز الخامل.

لذا يكون  $P_1$  الضغط الكلي ويساوي ضغط الغاز + ضغط البخار  $P_1, P_2$  وبذلك يكون الضغط الجزئي لبخار السائل ( $P$ ) حسب المعادلة ادناه.

$$P = \frac{n_1}{n_1 + n_2} P_1 \quad \text{.....(6-1)}$$

يتم ايجاد ( $n_1$ ) عدد مولات بخار السائل بواسطة  $W_1/M_1$  حيث  $W_1$  وزن البخار للسائل الذي وزنه الجزئي  $M_1$

اما عدد مولات الغاز ( $n_2$ ) فيمكن تعيينه من المعادلة:

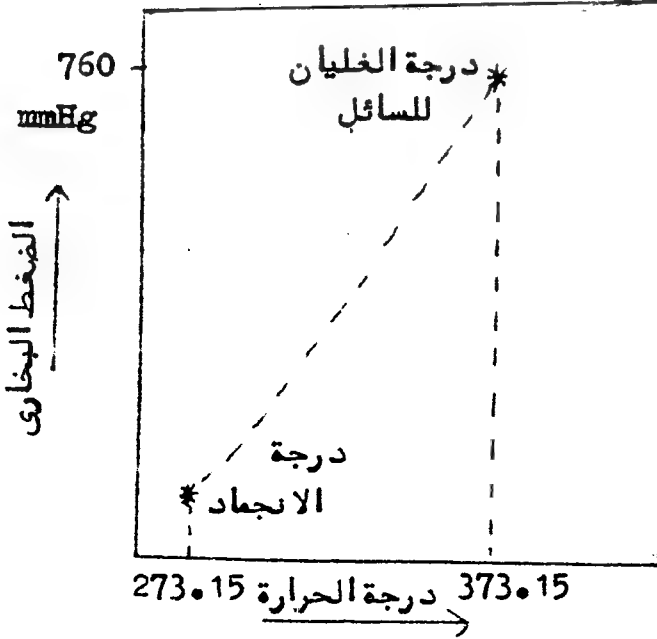
$$(P_1) V = n_2 RT$$

$V_2$  = حجم الغاز المشغول من قبل ( $n_2$ ) من عدد المولات عند درجة الحرارة  $T$ . وبعد معرفة كل من  $n_1$ ،  $n_2$  والضغط الكلي للمزيج ( $P_1$ )، يمكن حساب الضغط البخار للسائل، والنتائج التي تحصل بهذه الطريقة لها دقة عالية.

### 5-6 العوامل التي يعتمد عليها ضغط بخار السائل

من العوامل التي يعتمد عليها ضغط بخار السائل هو تغير درجة الحرارة، حيث نلاحظ زيادة الضغط البخاري عند ارتفاع درجة حرارة السائل، وهذه الزيادة تعود الى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات التي بدورها تستطيع من الافلات والتحول الى

بخار البائل ، وتستمر هذه الزيادة في ضغط البخار حتى يصبح ضغط البخار مساوياً للضغط الجوي الخارجي ، كما في الشكل أدناه :



الشكل (3-6) : تغير ضغط بخار سائل الماء مع درجة الحرارة .

كما ان طبيعة السائل بما فيها طبيعة الجزيئات ونوع ارتباط هذه الجزيئات في حيز السائل لها دورها في التأثير على ضغط بخار السائل ، حيث توجد قوى تجاذب بين الجزيئات . وهذه تعتمد على الاشكال الفراغية والهندسية للجزيئات كما ان لها اثراً على قوى الترابط بين الجزيئات لها علاقة مع قطبية الجزيئة أو عزم ثنائي القطب ، وغالباً ماتوصف بقوى فان ديرفال الجزيئية وعلى سبيل المثال ، عند مقارنة ضغط بخار الماء وضغط بخار رابع كلوريد الكربون ، نلاحظ ان الشكل الهندسي الجزيئة الماء بزاوية قدرها  $104^\circ$  بين  $H - O - H$  بينما جزيئة رابع كلوريد الكربون ذات شكل مجسم رباعي الوجوه ، وعلى هذه الصورة تكون جزيئة الماء مستقطبة . أما جزيئة رابع كلوريد الكربون فتكون غير مستقطبة لان عزم ثنائي القطب في الاواصر  $C-Cl$  الاربعة يلغي بعضه بعضاً ، ونتيجة لذلك ان القوى التي تربط بين جزيئات الماء هي نوع



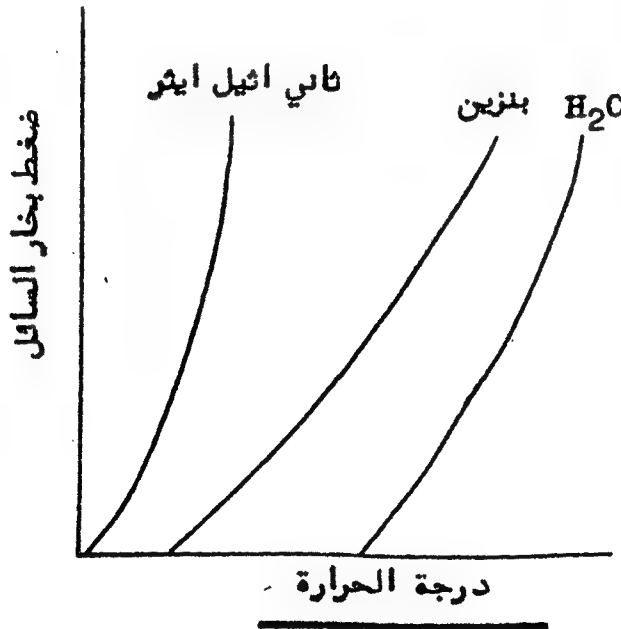
التجاذب بين عزوم ثنائي القطب والقوى بين جزيئات رابع كلوريد الكربون هي قوى فان ديرفال بدرجة رئيسية وعلى هذا الاساس يغلي الماء بدرجة  $100^{\circ}\text{C}$  ويغلي سائل رابع كلوريد الكربون بدرجة  $80^{\circ}$  ويغلي سائل رابع كلوريد الكربون بدرجة .

كما يعتمد الضغط البخاري للسائل على حجم الجزيئة وكتلتها والرسم ادناه يمثل تباين تغير ضغط بخار السائل بدرجة الحرارة لعدد من السوائل ذات الكثافات والاوزان الجزيئية المختلفة أيضاً .

ولكن رسم علاقة لوغاريتم ضغط بخار السائل مع درجة الحرارة يعطي خطاً مستقيماً استناداً الى معادلة كلايرون التالية :

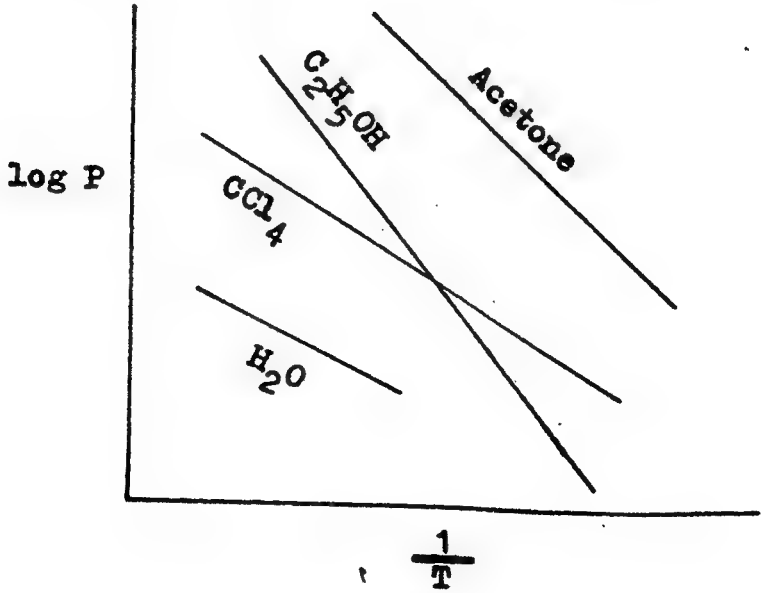
$$\log P = \frac{-A}{T} + B \quad \dots\dots\dots(6-2)$$

$$A = \frac{1}{2.303} \Delta H_{\text{vap}} \quad \text{حيث } A \text{ يعطي بالعلاقة}$$



الشكل (4-6) : علاقة ضغط بخار السائل مع درجة الحرارة

يفترض ان A و B كميتان ثابتتان وتعتمدان على طبيعة السائل



الشكل (5-6)

## 6-6 نظرية السوائل Theory of Liquids

هنالك نظريتان رئيسيتان لتركيب السوائل ، النظرية الاولى ترى ان السائل فلز ناقص . وما يؤيد هذه النظرية انه عند الدرجة الحرجة للغاز ، لا يمكن التمييز بين حالة السائل وحالة الغاز ، لذا سميت بالحالة المائعة للمادة .

أما النظرية الثانية فترى ان تركيب السائل يشبه البلورة باستثناء تلك التي تكون مرتبة جيداً في السائل وعلى مدى خمسة أو ستة اقطار جزيئية وهذا يؤدي في احوال كثيرة الى ترتيب قصير المدى واضطراب طويل المدى .

ان النظرية الثانية أكثر قبولاً ذلك لان اقتراب البلورة من نقطة انصهارها ، تكون كثافة البلورة قريبة جداً من كثافة سائلها . وهذا الاختلاف ناتج بسبب الحركات الحرارية للجزيئات .

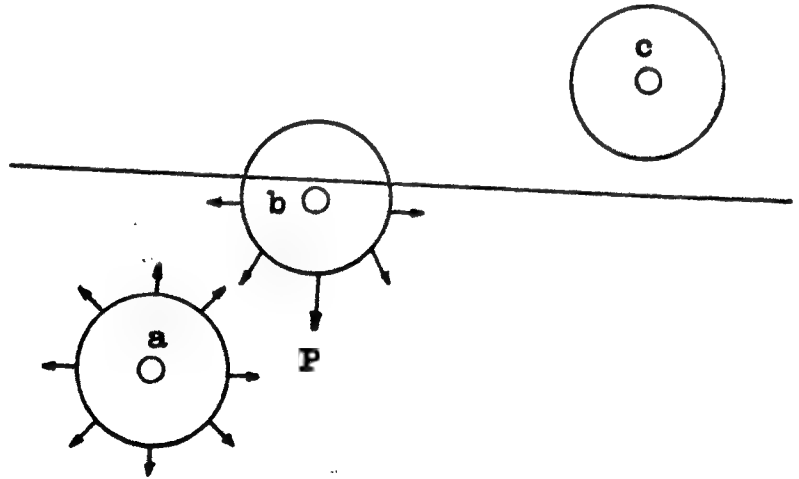
يمكن الوصول مباشرة الى خواص الحالة السائلة من دراسة مبادئ القوى  
الجزئية الداخلية والميكانيك الاحصائي. وهذا ماسوف نتناوله في شرحنا لموضوع  
تركيب السوائل والقوى الداخلية.

## 7-6 تركيب السوائل والقوى الداخلية

تخضع الجزيئات في السائل الى قوى عديدة تختلف فيما بينها تبعاً لموقعها  
على سطح السائل او داخله، وتدعى محصلة هذه القوى بالقوى الداخلية للسوائل.

ولغرض شرح طبيعة هذه القوى، نتصور وجود جزيئة (a) داخل السائل  
وجزيئة ثانية (b) على سطح السائل وجزيئة ثالثة في الحالة البخارية (c) كما في الشكل  
(6-6).

لنرسم حول هذه الجزيئات دائرة نصف قطرها يساوي نصف قطر دائرة  
التأثير المتبادل بين هذه الجزيئة والجزيئات المجاورة الاخرى من السائل.



الشكل (6-6) توزيع القوى الداخلية لجزيئات السائل

نرى من الرسم اعلاه ان تأثير القوى الجزيئية (a) موزع بانتظام في جميع  
الاتجاهات، وبذلك تصبح محصلة هذه القوى صفر، لذلك تكون نسبياً في حالة

سكون شبه مطلق، وعلى العكس، فبالنسبة الى جزيئة (b)، التي تقع على سطح السائل، فان محصلة القوى عليها لاتساوي صفراً. لذلك تخضع هذه الجزيئة لمنحصلة قوة كلية (P) تجذبها الى داخل السائل. بصورة عامة تخضع جزيئات سطح السائل لمثل هذه القوى وبذلك تشكل غشاءً سطحياً ينجذب نحو داخل السائل. أما الجزيئة (C) فأنها بعيدة عن سطح السائل وتخضع عملياً لطاقتها الحركية فقط بدون تأثيرها بجزيئات السائل الاخرى، وتكتسب الجزيئة (C) هذه الطاقة بعد تبخرها. أما الطاقة الحرارية المستهلكة فتدعى بحرارة التبخر Heat of Vaporization.

هنالك نوعان من القوى التي تعمل على الجزيئات في السائل، قوى التجاذب Attraction وقوى التنافر Repulsion بين الجزيئات تعود الى طبيعة التأثير المتبادل فيما بينها. وتتغير هذه القوى تبعاً للمسافة التي تفصل بين الجزيئات في السائل. أما سبب حدوث قوى التجاذب بين الجزيئات فيعود الى أربعة عوامل هي :

- 1 — التجاذب بين ثنائيات الاقطاب Dipole Dipole Attraction .
- 2 — عامل الحث Inductive effect .
- 3 — الاصرة الهيدروجينية Hydrogen bond .
- 4 — قوى لوندن London forces .

وتعمل هذه العوامل الاربعة على حدوث التجاذب بين الجزيئات نتيجة حدوث استقطاب في الجزيئة وتركيز الشحنة السابقة. وينشأ عزم ثنائي القطب نتيجة وجود الشحنتين المختلفتين على طرفي الجزيئة والتي تفصلهما مسافة معلومة.

لذلك فان جزيئات المادة السائلة ليست سوى ثنائيات اقطاب عديدة متجاورة عزم كل منهما ثابت في الحالة الغازية. وبما ان كل من ثنائيات الاقطاب هذه يقع في حقل قوى ثنائيات الاقطاب الاخرى فانه تتولد داخل السائل شبكة تجاذبية يؤثر فيها كل ثنائي قطب ويتأثر بها.

بالاضافة الى حدوث عزم ثنائي القطب الذي يتولد في الجزيئة ذات التوزيع الشحني غير المتناظر، هنالك احتمالية حدوث تشوه في توزيع الالكترونات داخلها

نتيجة وقوعها في الحقل الكهربائي للجزيئات الأخرى وهذا التشوه يؤدي إلى نشوء عزم ثنائي القطب الحثي يؤثر على الكثرونات الجزيئة المجاورة مستقطباً إياها ومشوهاً توزيعها، مما يزيد من شدة التأثير التجاذبي بين الجزيئتين المتجاورتين .

أما قوى لوندن (London forces) فتتسبب كنتيجة لحدوث انحراف في التوزيع المنتظم للشحنات في الذرة الواحدة، فإذا انخرفت النواة قليلاً عن مركز الذرة أدى ذلك إلى تجمع الشحنات في جهة على حساب نشوء فراغ في الجهة الأخرى، وهذا يؤدي إلى ظهور ثنائي قطب داخل الذرة، وعندما تقترب ذرة ثانية من الأولى يظهر فيها ثنائي قطب حثي نتيجة المفعول الحثي للذرة الأولى فتتولد جزيئة ذات عزم ثنائي القطب الضعيف، لكنه قادر على تحريض الجزيئات المجاورة الأخرى . ويظهر مثل هذا التشوه واضحاً في الذرات المكونة للجزيئات الثنائية الذرة مثل ( $N_2$ ,  $H_2$ ) . إن ثنائي القطب الحثي المتولد بهذه الطريقة غير قادر على توجيه حركة إحدى الذرات بالنسبة للذرة الأخرى في الجزيئات ثنائية الذرة كما هو الأمر في الجزيئات ذات ثنائيات الأقطاب الثابتة .

أما قوى الاصرة الهيدروجينية (Hydrogen bond) فتتسبب من التجاذب الكهربائي بين الجزء الموجب للهيدروجين كما في جزيئة الماء والجزء السالب من الجزيئة الموجودة داخل المحلول، وتختلف الاصرة الهيدروجينية اختلافاً كلياً من حيث الطبيعة والطاقة عن الأواصر الأخرى . في جزيئة الماء ( $H_2O$ ) ترتبط ذرة الأوكسجين باصرتين مشتركيتين طول كل واحد منها ( $1A^\circ$ ) مع ذرتي هيدروجين، بينما ترتبط ذرة الأوكسجين باصرة هيدروجينية طولها ( $1.8 A^\circ$ ) عند ارتباط جزيئات الماء بعضها مع بعض وهذه الروابط الهيدروجينية تعمل بالاشتراك مع القوى الأخرى على ربط جزيئات السوائل بعضها مع البعض أيضاً أقوى مما هو في الغازات .

## 8-6 الحجم الحر للسوائل

وضع العالم إيرنك (Eyring) نموذجاً لتركيب السوائل ذلك باعتماد الحجم الحر للسائل المتمثل بحجم الفراغات التي تفصل جزيئات السائل عن بعضها . ويتبع هذا الفراغ للجزيئات مجالاً لحركتها لذلك أطلق عليه الحجم الحر . عند درجة الحرارة

الضغوط في الظروف الاعتيادية، فان هذا الحجم يمثل 3% من الحجم الاصلي للسائل. ويمكن التحسس بوجود هذه الفراغات في هيكل السائل من خلال قياسات انضغاذية السوائل عند تسليط ضغط يتراوح بين 1-1000 ضغط جوي. ومن خلال الدراسات التي قام بها العالم بريجمان (Bridgmann) على قابلية انضغاط السوائل (B) والتي تتناقص مع ازدياد الضغط المسلط على السائل، وجد ان قيمة (B) تصبح صغيرة جداً عندما يصبح التقلص بالحجم حوالي 3% وعليه يمكن التعبير عن المقدار الذي يتقلص فيه حجم السائل.

عند رفع درجة حرارة السائل فان تركيز الجزيئات في الحالة البخارية يرتفع وان عدد الفراغات المتواجدة بين الجزيئات المكونة للسائل تزداد وتتوسع. وعند ازدياد كثافة البخار فان كثافة جزيئات السائل تنخفض وتزداد هذه العلاقة بزيادة درجة الحرارة حتى تتساوى كثافة البخار مع كثافة السائل عند الدرجة الحرجة للسائل.

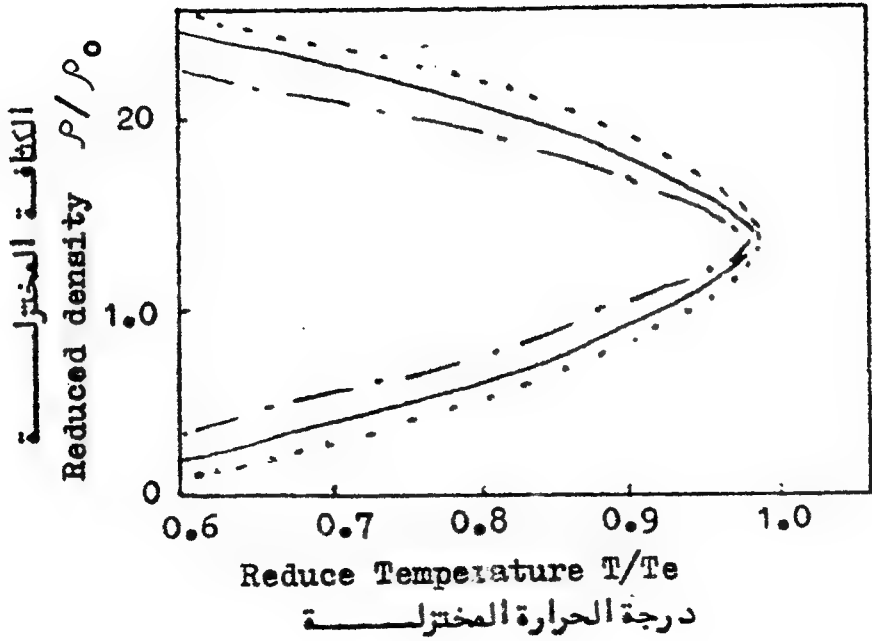
ان معدل كثافة السائل وبخاره  $P_{av}$  في حالة التعادل يجب ان تبقى ثابتة، بثبوت درجة حرارة السائل، ويزداد معدل الكثافة بزيادة درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$P_{av} = P_o - aT \quad \dots\dots\dots(6-3)$$

حيث ان  $P_o$  و  $a$  يمثلان كميتين ثابتتين واطلق على العلاقة أعلاه بقانون (Law of rectilinear diameters) قانون استقامة الاقطار.

ويمثل الرسم التالي الكثافة المختزلة مقابل درجة الحرارة المختزلة للهيليوم والاركون، والايثر ولكي يتم مد الرسم البياني الى نفس القياس كما هو مبين في الشكل (7-6):

اما عن كيفية توزيع الحجم الحر في السائل، فقد اقترح العالم ايرنك أن التوزيع الأكثر احتمالاً هو ان يكون على شكل فراغات (Vacancies) بقدر حجم جزيئات السائل تنوزع داخل حيز السائل، وان الجزيئة ترتب وضعها بحيث انها تحمل بعض خصائص الحالة الغازية، بذلك فأن وجود هذه الفراغات يعطي قيمة عالية لانثروبية السائل.



الشكل (7-6): يمثل قانون rectilinear diameters

## 9-6 السعة الحرارية للسوائل Heat Capacity of Liquids

يعبر عن السعة الحرارية، بمقدار الحرارة اللازمة لرفع حرارة منضومة مقدراً معيناً، وتعتبر من المقادير الدينامية الحرارية المهمة في دراسة خواص السائل الفيزيائية. يتم قياس سعة السائل الحرارية في اجهزة الضغط الثابت، ويرمز لها  $(C_p)$ . أما قيم السعة الحرارية عند الحجم الثابت فتكون  $(C_v)$ . فليس من السهل الوصول الى قيمتها من الناحية الجزيئية بسبب احتواء هذه القيم على الطاقة المستخدمة في التغلب على التجاذب الجزيئي خلال عملية التمدد الحاصلة من ارتفاع درجة حرارة السائل. ولربط علاقة  $C_p$  مع علاقة  $C_v$  نورد المعادلة التالية:

$$[C_p - C_v] = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \left[ P + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \dots\dots\dots(6-4)$$

واستناداً الى علاقة القانون الاول والثاني للدينامية الحرارية :

$$dU = dq - dw = TdS - P dV \quad \dots\dots\dots(6-5)$$

أو أن

$$dH = TdS + Vdp, \quad \dots\dots\dots(6-6)$$

بقسمة المعادلة اعلاه على dp بثبوت درجة الحرارة

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V \quad \dots\dots\dots(6-7)$$

لكن

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad \dots\dots\dots(6-8)$$

وبتعويض العلاقة (6-8) بالعلاقة (7-6) نحصل على المعادلة التالية :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + V \quad \dots\dots\dots(6-9)$$

وبما ان  $H = U + PV$  فإن تفاضل الطرف الايسر لهذه العلاقة ينتج المعادلة التالية :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T + P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T + V \quad \dots\dots\dots(6-10)$$

ومن المعادلتين (9-6) و (10-6) نحصل على العلاقة التالية :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T + P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = - T \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_P \quad \dots\dots\dots(6-11)$$

ومن كتابة التفاضل للعلاقة  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$  بالشكل التالي :



$$[P + (\frac{\partial U}{\partial U})_T] = -T (\frac{\partial V}{\partial T})_P / (\frac{\partial V}{\partial P})_T \quad \dots\dots\dots(6-12)$$

وعند تعويض  $(\frac{\partial U}{\partial V})_T$  من المعادلة اعلاه في المعادلة (11-6) نحصل على المعادلة التالية :

$$[P + (\frac{\partial U}{\partial U})_T] = -T (\frac{\partial V}{\partial T})_P / (\frac{\partial V}{\partial P})_T$$

ومن تعويض المعادلة اعلاه في المعادلة (4-6) نحصل على المعادلة ادناه :

$$(C_p - C_v) = -T \frac{(\partial V / \partial T)^2}{(\partial V / \partial P)_T} \quad \dots\dots\dots(6-13)$$

واذا اعتبرنا المقدار  $\alpha$  يساوي

$$\alpha = \frac{1}{V} (\frac{\partial V}{\partial T})_P$$

والمقدار  $\beta$  يساوي

$$\beta = - \frac{1}{V} (\frac{\partial V}{\partial P})_T$$

حيث ان المقدار  $\alpha$  يعبر عن معامل التمدد الحراري ، والمقدار  $\beta$  يعبر عن الانضغاط في درجة حرارة ثابتة (Isothermal Compressibility) ومن تعويض قيمتي  $\alpha$  و  $\beta$  في المعادلة (13-6) نحصل على العلاقة ادناه :

$$(C_p - C_v) = \frac{\alpha^2 VT}{\beta} \quad \dots\dots\dots(6-14)$$

يبين الجدول (1-6) قيم  $\alpha$  و  $\beta$  لبعض السوائل مع قيم السعة الحرارية عند ثبوت الضغط والحجم.

Liquids	$C_p$	$C_v$	$C_p - C_v$	$V$	$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$	$\beta = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$
	$\text{JK}^{-1} \text{Mole}^{-1}$	$\text{JK}^{-1} \text{Mole}^{-1}$	$\text{JK}^{-1} \text{Mole}^{-1}$	$\text{m}^3$		
$\text{H}_2\text{O}$	75.5	74.9	0.63	$18 \times 10^{-6}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$46 \times 10^{-11}$
Hg	27.8	23.6	4.25	14.6	1.81	3.4
$\text{CS}_2$	75.7	47.1	28.6	60	12.4	96
$\text{CCl}_4$	131.7	89.5	42.2	97	12.5	107
$\text{C}_6\text{H}_6$	134.3	91.6	42.7	89	12.5	97
$\text{CHCl}_3$	116.3	72.8	43.5	80	13.3	97

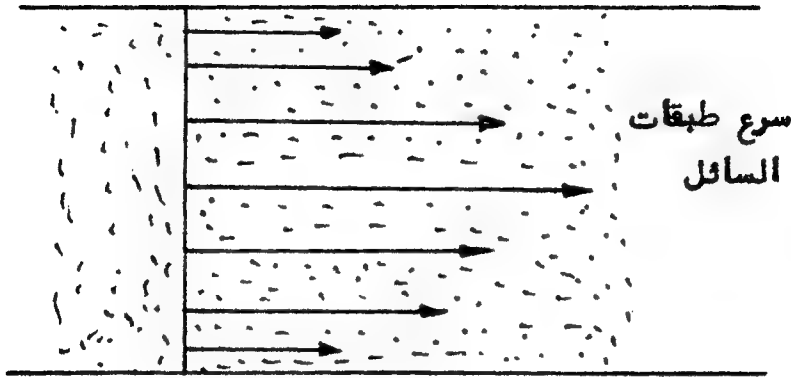
من القيم المعطاة في الجدول (6-1) للسعات الحرارية، وبالرغم من ان تمدد السوائل مقارنة بتمدد الغازات، وان الشغل المنجز من هذا التمدد في السوائل صغيرة جداً، فإن الفرق ( $C_p - C_v$ ) يكون واضحاً في السوائل وكما هو مبين في الجدول اعلاه.

ان قيم  $C_v$  المعطاة في الجدول اكثر واقعية خاصة اذا ملاحظنا ان قيم  $C_v$  للزئبق تقارب القيمة (3R). ان ايسط تفسير لهذه النتيجة هو اعتبار ذرة الزئبق تمتلك ثلاث درجات حرية اهتزازية، تساهم كل منها بمقدار  $R/2$  فيما لو كانت ذرات الزئبق متآصرة بصورة طفيفة مع بعضها البعض، لان ( $C_v$ ) للزئبق تساوي (3R) نظرياً أو 23.6 جول / درجة. مول تجريبياً، وبما ان الحجم المولي للزئبق 14.8 سم<sup>3</sup> ومعامل تمدده الحراري  $0.181 \times 10^{-3}$  لكل درجة وانضغاطيته الايسوثرمية =  $0.34 \times 10^{-11}$  سم<sup>3</sup> / دايين، فان سعة الزئبق الحرارية  $C_v$  المحسوبة وفق هذه القيم من معادلة (6-14) عند درجة حرارة 25 م° تساوي 27.25 جول / درجة. مول.

## 10-6 لزوجة السوائل Viscosity of Liquids

تبدى المواد السائلة مقاومة لجريانها نتيجة قوى التجاذب بين جزيئاتها وتدعى مثل هذه المقاومة للجريان باللزوجة. وبصورة عامة، ان لزوجة الغازات أقل بكثير من لزوجة السوائل، كما ان لزوجة السوائل أقل بكثير من لزوجة المواد الصلبة.

ولتفسير ظاهرة اللزوجة في السوائل، يمكن ان نتصور ان السائل يجري بشكل حر تحت تأثير قوة دافعة يقع مركزها في احدى طبقات السائل، وبما ان الجزيئات تنتقل بحركة عشوائية بين طبقات السائل، فان انتقال جزيئة من الطبقة السريعة الى الطبقة البطيئة حركياً، تزيد من طاقتها الحركية. كما ان انتقال بعض جزيئات السائل من الطبقة البطيئة نتيجة حركتها العشوائية الى الطبقة المركزية السريعة، تعمل على تقليل حركتها، وبذلك نستنتج ان من خلال هذه الانتقالات للجزيئات بين طبقات السائل المتباينة السرعة الى ظهور قوى حركية مسرعة للطبقات البطيئة وظهور قوى حركية مبطئة لسرع الطبقات السريعة:



الشكل (8-6): سرعة جريان طبقات السائل.

من الشكل (8-6) نلاحظ ازدياد سرعة طبقات السائل التي في مركز الأنبوب مقارنة بالطبقات التي تليها بسبب قلة مقاومة هذه الطبقة خلال حركتها.

تتناسب قوة الممانعة أو الاحتكاك (F) بين طبقتي السائل تناسباً طردياً مع عدد الجزيئات المنتقلة بين الطبقتين المتجاورتين أي مع مساحة مقطع التماس بين الطبقتين المتجاورتين (S) ومع تدرج السرعة الأصلية للطبقة المركزية (Velocity Gradient)  $(dv/dx)$  إذا اعتبرنا (x) يقابل المسافة بين الطبقتين فإن :

$$f \propto S \frac{dv}{dx} \quad \dots\dots\dots(6-15)$$

$$f = \eta S \left( \frac{dv}{dx} \right) \quad \dots\dots\dots(6-16)$$

حيث  $\eta$  = ثابت التناسب ويعرف بمعامل اللزوجة، ويعتبر هذا الثابت صفة فيزيائية مميزة لكل سائل ويقل بازدياد درجة حرارة السائل.

يمكن تعريف معامل اللزوجة من المعادلة (6-16)، بأنه القوة بالدائين لكل وحدة المساحة اللازمة لابقاء فرق الوحدة للسرعة مابين طبقتين متوازيتين من سائل مسافة سنتيمتر واحد عن بعضهما. يرمز الى وحدات اللزوجة بما يسمى البواز

(Poise) نسبة الى العالم بوازيلي (Poisenille) الذي درس في هذه الظاهرة . وتكون وحدات معامل اللزوجة كما يلي :

$$\eta = \frac{f / S}{dV/dx}$$

أما وحدة معامل اللزوجة وفق النظام الحديث للوحدات (SI - Units) وهي كيلو غرام / متر . ثا وتدعى باسكال ثانية (Pa.S) وللربط بين النظام الاول (CgS) والنظام الحديث للوحدات فان :

$$1 \text{ Poise} = 0.1 \text{ Pa. S}$$

$$\text{كيلو غرام / متر . ثا} = 0.1 \text{ غم / cm . ثا}$$

## 11-6 طرق قياس لزوجة السوائل

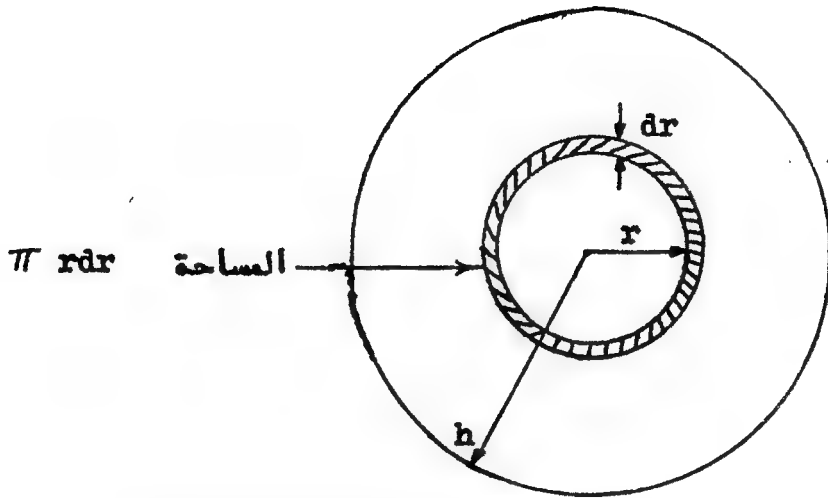
### Methods of Viscosity Measurements

#### 1 — الطريقة التي تعتمد على معادلة بوازيلي :

درس العالم بوازيلي ظاهرة اللزوجة في السوائل عممت من بعد ذلك على الغازات ، وتربط معادلة بوازيلي معامل لزوجة السائل وسرعة جريانه خلال انبوب طوله ( L سم ) ونصف قطره ( R سم ) . تخضع طبقة السائل التي تجاور جدران الانبوب لمقاومة احتكاكية تتناقص كلما اقتربت هذه الطبقة من مركز الانبوب ، حيث تكون سرعة الجريان في المركز على أعظم مايمكن . اذا افترضنا وجود طبقة تبعد ( r سم ) عن مركز الانبوب تتحرك بسرعة v ، فيعبر عن قوة الاحتكاك بالطبقة التي تليها بالمعادلة التالية :

$$f = -2 \pi r L \eta \frac{dv}{dr} \quad \dots\dots\dots(6-17)$$

وضعت الإشارة السالبة لكي يبقى المقدار موجباً ، حيث ان  $dV/dr$  ذو إشارة سالبة .



الشكل (9-6): يوضح جريان السائل في الأنبوب

وعندما تحصل حالة الاستقرار في جريان السائل فإن قوة الاحتكاك تتساوى مع القوة التي تدفع السائل خلال الأنبوب، وبما أن الضغط هو القوة المسلطة على وحدة السطوح فإن القوة الدافعة تساوي:

$$Fr = \pi r^2 (p_1 - p_2) \quad \text{.....(6-18)}$$

حيث  $(P_2)$  ضغط خروج السائل، و  $(P_1)$  ضغط دخوله، و  $(F)$  القوة الدافعة في حالة الاستقرار، تتساوى قوة الاحتكاك مع القوة الدافعة وعندها تتساوى المعادلتان (11-6) و (18-6) أي أن:

$$-\eta \frac{dv}{dr} 2 \pi r L = \pi r^2 (p_1 - p_2) \quad \text{.....(6-19)}$$

$$dv = -\frac{r}{2\eta L} (p_1 - p_2) dr \quad \text{.....(6-20)}$$

وبتكامل العلاقة اعلاه نحصل على المعادلة أدناه:

$$V = -\left(\frac{p_1 - p_2}{4\eta L}\right) r^2 + \text{constant} \quad \text{.....(6-21)}$$

ولما كانت سرعة الطبقة الملاصقة لجدار الانبوب تساوي صفراً، عليه تكون قيمة (V) صفراً عندما يكون  $R = r$ ، ولذا تصبح المعادلة (6-21) كما يلي :

$$V = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad \dots\dots\dots(6-22)$$

إذا اخذنا بنظر الاعتبار الحجم الكلي للسائل المار في الانبوب في الثانية الواحدة، فيمكن حسابه بتكامل حاصل ضرب مساحة مقطع الاسطوانة ( الانبوب) في سرعة الجريان من قيمة صفر الى R والذي يساوي المعدل الحجمي للجريان أي أن :

$$\frac{dV}{dt} = \int_0^R 2\pi r V dr \quad \dots\dots\dots(6-23)$$

فإذا عوضنا عن (V) بقيمتها في المعادلة (6-22)، ثم أجرى تكامل للمعادلة الناتجة عندها تنتج المعادلة التالية :

$$\eta = \frac{\pi (p_1 - p_2) R^4 t}{8VL} \quad \dots\dots\dots(6-24)$$

إذا اعتبرنا فرق الضغط  $P = (P_1 - P_2)$  فإن V يساوي حجم السائل المتدفق في الزمن t من خلال انبوبة شعرية نصف قطرها R وطولها L تحت ضغط ثابت P .

لقياس اللزوجة لسائل معين، فإنه ليس بالضرورة قياس جميع المقادير الواردة في المعادلة (6-24)، لذا يتم قياس لزوجة السائل نسبة الى سائل مرجع آخر كالماء الذي عينت لزوجته بدقة عند درجة حرارة معلومة، ومن مقارنة فترات جريانها ومعرفة كثافة السائلين ومعرفة لزوجة السائل المرجع يتم إيجاد لزوجة السائل المطلوبة وكما يلي :

إذا اعتبرنا  $1$ ،  $2$  لزوجة السائل والماء، وكانت  $d_1$  و  $d_2$  كثافة السائل والماء على التوالي.  $t_1$ ،  $t_2$  زمن جريان السائل والماء عندما يكون (V) نفس الحجم للسائل والماء، عندئذ من معادلة بوازيلي :

$$\mu_1 = \frac{\pi p_1 R^4 t_1}{8LV} , \quad \mu_2 = \frac{\pi p_2 R^4 t_2}{8LV}$$

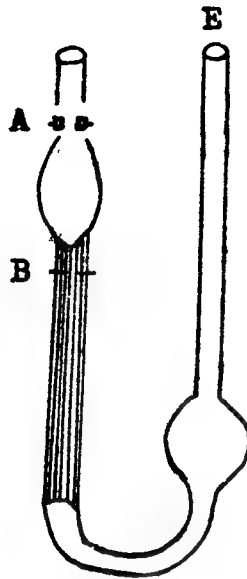
حيث  $P_1$  ،  $P_2$  الضغط الكلي على السائل والماء على التوالي ، ومن المعادلتين اعلاه فان :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{p_1 t_1}{p_2 t_2} \quad \dots\dots\dots(6-25)$$

ولكن ضغط السائل يتناسب طردياً مع كثافته لذلك :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{d_1 t_1}{d_2 t_2} \quad \dots\dots\dots(6-26)$$

ولقياس زمن جريان السائل وزمن جريان الماء يتم ذلك تجريبياً باستعمال مقياس اللزوجة الذي يدعى مقياس اوستوالد للزوجة (Ostwald Viscometer) المبين في الشكل (10-6) أدناه :



الشكل 10-6 : جهاز اوستوالد القياس اللزوجة .



كما في الشكل (6-10) يتم ادخال حجم معين من السائل من الطرف (E) ويدخل البصلة (C) ثم يتم بواسطة المص ادخال السائل الى البصلة (D) وعند دخول مستوى السائل الى (A) يتم بدء قياس زمن الجريان وحتى وصوله الى العلامة (B) بواسطة ساعة توقيت . بعدئذ ينظف مقياس اللزوجة ، ثم يدخل السائل الاخر ذو اللزوجة المعلومة كالماء وبنفس درجة الحرارة التي تم قياس زمن الجريان للسائل الاول ثم يتم قياس زمن جريان الماء .

ومن معرفة كثافة السائل والماء ومعرفة  $t_2$  زمن جريان الماء و  $t_1$  زمن جريان السائل يتم ايجاد  $\eta$  باستخدام المعادلة (6-26) .

## ٢ — الطريقة المعتمدة على معادلة ستوك

يطلق على هذه الطريقة احياناً بطريقة الكرة الساقطة (Falling Sphere Methods) - باستعمال قانون ستوكس . وذلك من قياس زمن سقوط كرة صلبة في السائل ، فعند سقوط الجسم الكروي الصلب الذي نصف قطره  $r$  وكثافته  $\rho_s$  تحت جاذبية الارض خلال السائل الذي كثافته  $\rho_l$  يخضع لقوة الجاذبية الارضية .

ان القوة التي تسبب نزول الكرة خلال السائل تساوي كتلة الكرة الفعالة مضروبة في التعجيل الارضي وتستخرج الكتلة الفعالة بطرح كتلة السائل المزاح من كتلة الكرة الاعتيادية . أما القوة المعيقة لنزول الكرة الى الأسفل فتكون قوة الاحتكاك التي تعمل نحو الاعلى ، لذا فإن قوة الاحتكاك تساوي :

$$f = 6 \pi r \eta v \quad \dots\dots\dots(6-27)$$

حيث ان  $v$  = السرعة النهائية و  $\eta$  معامل اللزوجة للسائل .

اذا تم اسقاط الكرة عمودياً في السائل فان قوة نزول الكرة تساوي  $(m-m_1)g$  ، حيث ان  $m$  ، و  $m_1$  يمثلان كتلة الكرة وكتلة الماء المزاح على التوالي ،  $g$  = التعجيل الارضي .

لكن عند سقوط الكرة بسرعة ثابتة ، فإن القوة الدافعة للنزول تساوي القوة الدافعة الى الاعلى وهي قوة الاحتكاك لذلك :

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_1) g = 6 \pi \eta r v$$

حيث ان  $\rho$  يمثلان كثافة الكرة وكثافة الماء على التوالي . وبترتيب المعادلة اعلاه نحصل على العلاقة ادناه :

$$\eta = \frac{2 r^2 (\rho - \rho_1) g}{9 v} \quad \dots\dots\dots(6-28)$$

وبواسطة قياس زمن نزول الكرة بين نقطتين معلومتين المسافة يمكن إيجاد سرعة نزول الكرة، ومن معرفة نصف قطر الكرة الساقطة وكثافتها وكثافة السائل يمكن إيجاد معامل لزوجة ذلك السائل .

تستعمل طريقة الكرة الساقطة في إيجاد لزوجة السائل العالية اللزوجة، والجدول (2-6) يبين قيم اللزوجة والكثافة لبعض السوائل عند درجات حرارة مختلفة .

Liquid	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C
H <sub>2</sub> O	1.792	1.005	0.656	0.469	0.356	0.284
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1.773	1.200	0.834	0.592		
n-C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> OH	5.186	2.948	1.782			0.540
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.912	0.652	0.503	0.392	0.329	
CHCl <sub>3</sub>	0.700	0.563	0.464	0.389		
CCl <sub>4</sub>	1.329	0.969	0.739	0.585	0.468	0.384
Hg	1.685	1.554	1.450	1.367	1.298	1.240

الجدول (2-6) : معامل لزوجة بعض السوائل بوحدة (10<sup>-3</sup> Kg m<sup>-1</sup>S<sup>-1</sup>)

## 12-6 تأثير درجة الحرارة على لزوجة السوائل

### Effect of temperature on Viscosity

تظهر السوائل بشكل عام نقصاناً في لزوجتها عند ارتفاع درجة حرارة السائل ويمكن النظر الى هذا التأثير من خلال ملاحظة جريان السائل (Fluidity) وهي مقلوب معامل اللزوجة :

$$\phi = \frac{1}{\eta} \quad \dots\dots\dots(6-29)$$

وتعطي سرعة جريان السائل فكرة عن ميكانيكية حركة جزيئات السائل في الأنبوب بشكل يشابه سرعة حدوث التفاعل الكيميائي ونلاحظ في كلا السرعتين يتناسب مع مقدار رأسي يشتمل على مقدار يدعى بطاقة التنشيط. وفي حالة سرعة الجريان يدعى بطاقة تنشيط الجريان كما في المعادلة ادناه : —

$$\phi \propto e^{-\Delta E_{vis}/RT} \quad \dots\dots\dots(6-30)$$

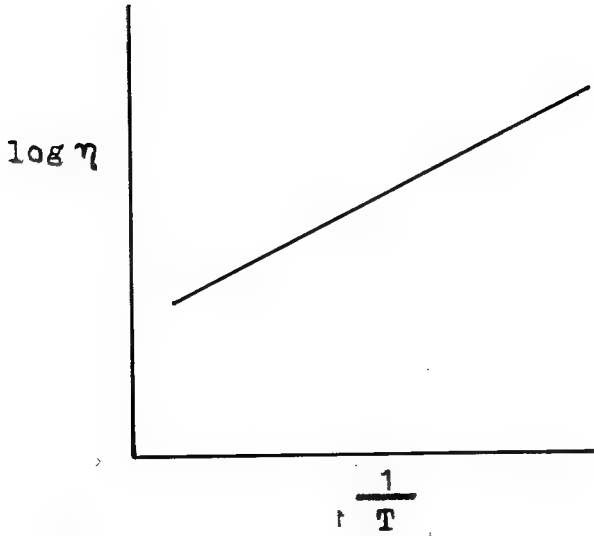
من معادلة (6-29) ومعادلة (6-30) ينتج : —

$$\eta \propto e^{\Delta E_{vis}/RT}$$

$$\eta = A_e e^{\Delta E_{vis}/RT} \quad \dots\dots\dots(6-31)$$

حيث (A) يمثل ثابت التناسب ويمكن رسم المعادلة اعلاه بعد تحويلها الى الصيغة اللوغاريتمية التالية : —

$$\log \eta = \log A + \frac{\Delta E_{vis}}{2.303 RT} \quad \dots\dots\dots(6-32)$$



الشكل (11-6): الرسم البياني  $\log$  مقابل  $1/T$

من الرسم البياني اعلاه فان ميل الخط المستقيم المرسوم يساوي  $E_{vis}/2.3R$  ونقطة تقاطعه مع المحور الصادي يساوي  $(\log A)$ .

مثال (1-6):

اجريت تجربة لتعيين لزوجة سائل عضوي باستعمال جهاز اووستوالد بدرجة  $25^\circ C$ . اذا كان زمن مرور حجم معلوم من السائل العضوي خلال الانبوب الشعري 40 ثانية ومرور نفس الحجم من الماء 27 ثانية، جد لزوجة السائل العضوي اذا علمت ان كثافة السائل والماء بدرجة  $25^\circ C$  تساوي 0.785 غن/سم<sup>3</sup>، 0.9971 على التوالي وان لزوجة الماء عند هذه الدرجة الحرارية تساوي 0.000895 Poise  
الحل: —

$$\frac{\eta_{H_2O}}{\eta_{\text{السائل}}}} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{\text{السائل}}} \cdot \frac{t_{H_2O}}{t_{\text{السائل}}}}$$

$$\frac{0.000895}{\eta_{\text{السائل}}}} = \frac{0.9971 \times 27}{0.785 \times 40} \Rightarrow \eta_{\text{السائل}} = 0.00109 \text{ Poise}$$

مثال (2) :

احسب الزمن اللازم لسقوط كرة من الكوارتز قطرها  $100 \text{ A}^\circ$  مسافة 50 سم من الماء المقطر بدرجة 25 م°. اذا كانت كثافة الكوارتز 2.6 غم / سم<sup>3</sup>، وكثافة الماء 0.9971 غم / سم<sup>3</sup>، وان معامل لزوجة الماء بدرجة 25 م° هو 0.0009 باسكال ؟

الحل :

قطره كرة الكوارتز  $= 100 \times 10^{-8} \text{ سم} = 10^{-6} \text{ سم}$   
 نصف قطر كرة الكوارتز  $= 5 \times 10^{-7} \text{ سم}$   
 معامل لزوجة الماء  $= 0.0009 \text{ باسكال} = 0.009 \text{ يوير}$   
 سرعة انحدار كرة الكوارتز  $= dx/dt = 50/dt$   
 حيث ان  $dt = \text{زمن نزول كرة الكوارتز في عمود الماء}$   
 لكن :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2r^2 (\rho - \rho_0) g}{9 \eta}$$

$$\frac{50}{dt} = \frac{2(5 \times 10^{-7})^2 (2.6 - 0.9971)(980)}{9 \times 0.009}$$

مثال (3) :

اذا علمت ان لزوجة سائل الايثانول بدرجة  $20^\circ \text{C}$  تبلغ 0.00120 وتبلغ  $(0.000834) \text{ (Kg m}^{-1} \text{ S}^{-1})$  بدرجة حرارة  $40^\circ \text{C}$ ، احسب طاقة تنشيط جريان سائل الايثانول .

الحل :

$$\log \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{E_{\text{vis}}}{2.3R} \left[ \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right]$$

حيث ان 1 معامل لزوجة سائل الايثانول بدرجة  $20^\circ \text{C}$   
 وان 2 معامل لزوجة سائل الايثانول بدرجة  $40^\circ \text{C}$

$$\log \frac{0.0012}{0.000834} = \frac{E_{vis}}{2.3 (8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ Mol}^{-1})} \left[ \frac{313 - 293}{313 \times 293} \right]$$

$$E_{vis} = \frac{0.1580 \times 19.12 \times 91709}{20}$$

$$E_{vis} = 13855.4 \text{ J.Mol}^{-1} \text{ ( جول / مول )}$$

### 13-6 تطبيقات اللزوجة في إيجاد الوزن الجزيئي للجزيئات الكبيرة Molecular Weight From Viscosity Measurements

ان احدى الطرق المهمة في إيجاد الوزن الجزيئي للجزيئات الكبيرة كجزيئات البوليمرات هي طريقة اللزوجة اضافة الى طرق اخرى مثل الازمومتري، اشتطارة الضوء (Light Scattering) وطريقة الرسوية (Sedimentation) وتعتبر طريقة اللزوجة من اسهل الطرق المختبرية في إيجاد الوزن الجزيئي للبوليمر .

ان أول من استخدم هذه الطريقة هو العالم شتودنكر (Staudinger) عام (1930) وبين ان لزوجة المحاليل المخففة للبوليمرات تتغير بصورة منتظمة مع تغير تركيز البوليمر في المذيب . وكلما ازداد الوزن الجزيئي للبوليمر ازدادت لزوجة المحلول ز ، بسبب وجود هذه الجزيئات الكبيرة في المذيب والتي تلعب دوراً مهماً في عرقلة انسيابية المذيب وجريانه .

إذا اعتبرنا  $\eta, \eta_0$  معاملي اللزوجة للمذيب وللمحلول الحاوي على البوليمر وان  $\eta/\eta_0$  يطلق عليها اللزوجة النسبية ( $\eta_r$ ) (relative viscosity) وتساوي : —

$$\eta/\eta_0 = \eta_r$$

كما ان اللزوجة النوعية  $\eta_{sp}$  تساوي :

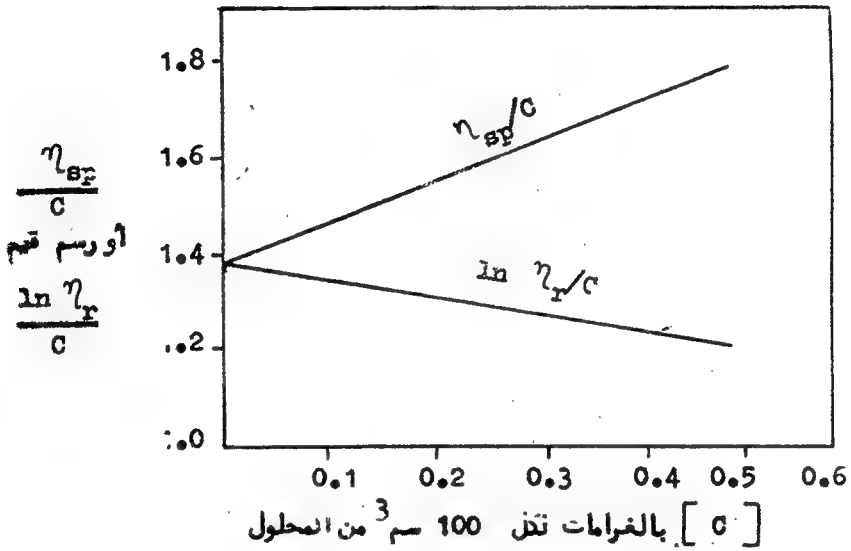
$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1 = \eta_{sp} \quad \dots\dots\dots(6-33)$$

وتمثل النسبة  $\eta_{sp}/C$  ، التغير في اللزوجة لكل وحدة تركيز للبوليمر ، وهي

دالة للوزن الجزيئي، وحيث ان هذه النسبة تتغير بتغير التركيز، لذا يجب مد الخط المستقيم من  $\eta_{sp}/C$  مقابل التركيز  $C$  الى قيمة التركيز المساوي صفر، كما في الشكل (12-6)، عندها فان قيمة اللزوجة الناتجة تدعى باللزوجة الفعلية للمحلول (Interinsic Viscosity) لذلك فان  $[\eta]$  تساوي

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \left( \frac{\eta_{sp}}{C} \right) \quad \dots\dots\dots(6-34)$$

$[C] =$  تركيز محلول الجزيئات الكبيرة مقدراً بالغرامات لكل 100 سنتيمتر مكعب من المذيب.



أو رسم قيم  $[C]$  بالغرامات لكل 100 سم<sup>3</sup> من المحلول

الشكل (12-6): رسم  $\frac{\eta_{sp}}{C}$  أو  $\frac{\ln \eta_r}{C}$  مقابل التركيز

وترتبط اللزوجة الفعلية للمحلول مع الوزن الجزيئي للبوليمر وفق المعادلة أدناه:

$$[\eta] = K M^\alpha \quad \dots\dots\dots(6-35)$$

حيث  $\alpha$  و  $K$  ثابتان يعتمدان على نوع البوليمر ونوع المذيب المستعمل ومن معرفة الثابتين  $\alpha$  و  $K$  يمكن استعمال المعادلة (35-6) من استخراج الوزن الجزيئي للبوليمر. ويبين الجدول أدناه بعض قيم الثابت  $K$  والثابت  $\alpha$  لبعض البوليمرات في مذيبات مختلفة.

يبين الجدول (3-6) قيم  $\alpha$  و  $K$  لبعض البوليمرات عند درجات حرارة مختلفة.

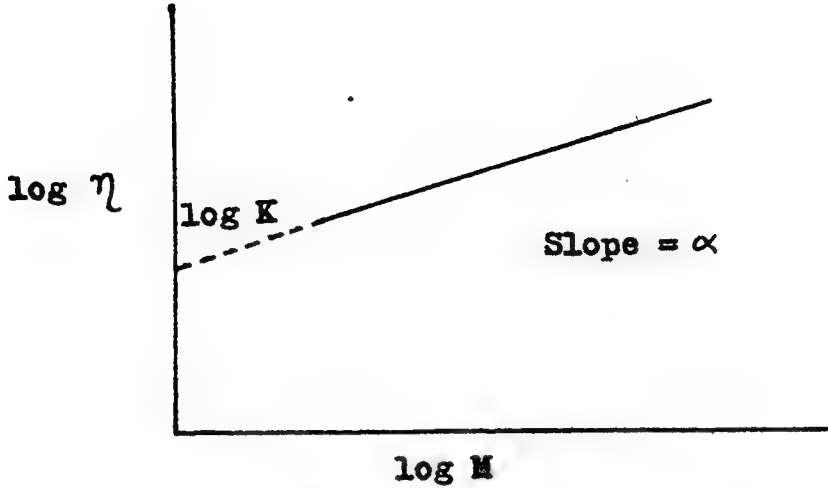
البوليمر	المذيب	$T^{\circ}C$	$\alpha$	$K \times 10^4$
مثيل ميثاكريلات بوليمر	اسيتون	30	0.52	14.7
	بنزين	35	0.71	1.28
بوليستايرين بوليمر	تولوين	25	0.72	1.18
	تولوين	34	0.72	1.15
	تولوين	45	0.72	1.14
	اثيل البنزين	40	0.68	1.76
اثلين ترفثاليت بوليمر	فينول	50	0.709	5.51

كما ان المعادلة (35-6) تستعمل في إيجاد الثابت  $\alpha$  والثابت  $K$  بعد معرفة الوزن الجزيئي الذي تم تعيينه بطرق أخرى كطريقة الأوزموتري وطريقة استطارة الضوء وغيرها، وذلك من رسم قيم  $\log [\eta]$  مقابل قيم  $\log M$  حسب المعادلة التالية:

$$\log [\eta] = \alpha \log M + \log K \quad \dots\dots\dots(6-36)$$



التالي . حيث ينتج خطاً مستقيماً ميله  $\alpha$  ونقطة تقاطعه  $\log K$  وكما في الرسم



الشكل (13-6): رسم قيم  $[\eta]$  مقابل قيم  $\log M$  لإيجاد  $K$  ،  $\alpha$

مثال (4):

إذا كانت قيمتا الثابتين  $K$  و  $\alpha$  لمادة بوليمر الستايرين المذاب في سائل التولوين عند درجة حرارة 25 م° هي  $3.7 \times 10^{-4}$  و 0.62 على التوالي . احسب الوزن الجزيئي للبوليمر إذا كانت اللزوجة الفعالية للبوليمر تساوي 0.74 بواز ؟

الحل:

$$[\eta] = K M^{\alpha}$$

$$\log [\eta] = \log K + \alpha \log M$$

$$\log 0.74 = \log (3.7 \times 10^{-4}) + 0.62 \log M$$

$$-0.13077 = -3.4318 + 0.62 \log M$$

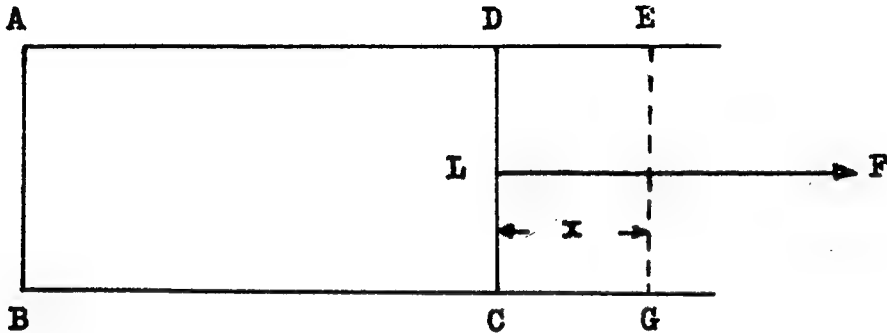
$$\log M = 5.32424$$

## 14-6 الشد السطحي Surface tension

تعاني الجزيئات داخل السائل من قوى جذب متساوية وفي جميع الاتجاهات بسبب التجاذب مع الجزيئات الأخرى المحيطة بها. بينما تنضغط جزيئات السطح بمحصلة قوى جذب نحو مركز السائل وهكذا يظهر السائل وكأنه محاط بغشاء رقيق يتقلص لأخذ أقل مساحة ممكنة. يبدي السائل مقاومة لتمدد سطحه، لذا ترافق زيادة سطح السائل زيادة في طاقته السطحية مما يفترض استهلاك مقدار من الشغل لنقل جزيئات السائل الداخلية إلى الطبقة السطحية بقوة معاكسة للقوة العاملة على جذب جزيئات السائل نحو الداخل.

تدعى هذه القوة في سطح السائل بالشد السطحي ويدعى أيضاً بالتوتر السطحي (Surface Tension). وتعرف القوة اللازمة لزيادة سطح السائل بمقدار (سم<sup>2</sup>) سنتيمتر مربع واحد، أي القوة المطبقة على سنتيمتر مربع واحد من سطحه والمعاكسة لزيادة السطح بالشد السطحي (γ)، ويأخذ وحدات دايين لكل سنتيمتر مربع أو الأراك / سنتيمتر مربع.

وللحصول على شرح واضح لماهية هذا الشغل، نتصور وجود طبقة رقيقة جداً من سائل امتد فوق هيكل سلكي مستطيل الشكل أحد أضلاعه متحركة كما في الشكل (14-6) أدناه:



الشكل (14-6): رسم تخطيطي للشد السطحي

نلاحظ من الشكل (6-14) المستطيل الناتج من السلك المعدني GBAE  
أما الجانب  $CD = L$  فيمثل الجانب المتحرك في الشكل . اذا تم تسليط قوة مقدارها  
 $F$  لتحريك الجانب  $CD$  ضد قوة الشد السطحي الموجودة على الغشاء داخل الشكل  
المستطيل ، فان الشغل المبذول لتحريك الجانب  $CD$  الى الموقع  $ED$  يساوي :

$$W = f x \quad \dots\dots\dots(6-37)$$

حيث ان القوة العاملة  $f$  يجب ان توازن الشد السطحي على الجانب  
 $CD$  . واذا رمزنا  $(\gamma)$  للقوة لكل سنتيمتر طول على الجانب وبما انه يوجد جانبيين  
للغشاء فان :

$$f = 2\gamma l \quad \dots\dots\dots(6-38)$$

$$1 = \text{طول الجانب } CD$$

$$\gamma = \text{قوة الشد السطحي على جانب الغشاء } CD .$$

لذلك فمن معادلة (6-37) ومعادلة (6-38) نحصل على العلاقة التالية :

$$W = f x = 2 \gamma l x \quad \dots\dots\dots(6-39)$$

ومن المعادلة (6-38) ، يمكن تعريف  $\gamma$  كما في العلاقة التالية  
 $\gamma = \frac{F}{2l}$  ، أو انها القوة بالداينات العاملة على طول سنتيمتر واحد من السطح . كما ان  
 $2l x = \Delta A$  مساحة الغشاء على جانبيه الاثنى على طول الجانب  $CD$  وتساوي  $\Delta A$  ،  
لذلك فأن :

$$W = \gamma (2 l x) = \gamma \Delta A$$

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots(6-40)$$

وبعبارة اخرى فان الشغل بالاراك اللازم لتكوين سنتيمتر مربع واحد من  
المساحة السطحية للغشاء يمثل الشد السطحي .

مثال (5) :

اذا علمت ان ضغط بخار السائل عضوي بين 10 م و 47 م يمكن تمثيله  
بالعلاقة التالية :

$$\log P = \frac{-1149}{T} + 7.48$$

جد حرارة تبخير السائل بالجول لكل غرام، اذا علمت ان الوزن الجزيئي للسائل يساوي 50.5 .

الحل :

من المعادلة اعلاه يمكن رسم قيم  $\log P$  مقابل  $1/T$  فان قيمة ميل الخط المرسوم تساوي :

$$\text{Slope} = -1149$$

ولما كان الميل حسب المعادلة الاصلية يساوي :

$$(\text{Slope}) (-2.303) (8.314) \text{ JK}^{-1} \text{ Mol}^{-1} = \Delta H_v$$

حيث  $\Delta H_v$  = حرارة تبخير السائل :

$$\Delta H_v = (-1149)(2.303)(8.314)$$

$$= 21860.5 \text{ J Mole}^{-1}$$

أما حرارة التبخير لكل غرام من السائل :

$$\text{حرارة التبخير للسائل بالجول / غرام} = \frac{21860.5}{50.5}$$

$$= 432.88 \text{ J/gm (جول / غرام)}$$

من الطرق العديدة لقياس الشد السطحي نذكر الطرق التالية :

1 — طريقة جهاز مقياس الشد السطحي tensiometer

2 — وزن القطرة Drop Weight

3 — ضغط الفقاعة Bubble Pressure

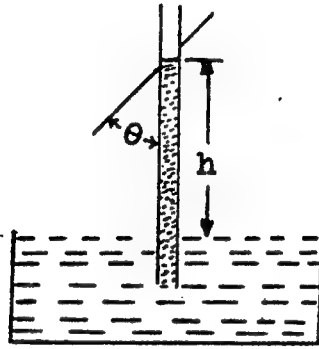
4 — طريقة ارتفاع السائل في الانابيب الشعرية Capillary Rise Method

وتعتبر الطريقة الاخيرة من الطرق المهمة مختبرياً في ايجاد الشد السطحي

للسوائل .

## 15.6 طريقة ارتفاع السائل في الانابيب الشعرية لقياس الشد السطحي Surface tension By Capillary Rise Method

تعتمد هذه الطريقة على قاعدة ارتفاع معظم السوائل في الانابيب الشعرية الى مستوى أعلى من مستوى السائل الخارجي الذي غمر فيه الانبوب الشعري . أما اذا كان السائل لا يبلل جدار الانبوب الشعري كما هو في سائل الزئبق فان مستوى الزئبق في الانبوب الشعري يكون أوطأ من مستوى الزئبق في الاناء الذي غمر فيه الانبوب الشعري . في النوع الاول من السوائل تكون نهاية السائل في الانبوب الشعري مقعرة وتكون محدبة في النوع الثاني كالزئبق وكما في الشكل (15-6) .



الشكل (15-6) : طريقة ارتفاع السائل في الانبوب الشعري لقياس الشد السطحي .

لغرض القاء الضوء على هذه الطريقة ، نفرض ان قطر الانبوب الشعري =  $r$  الذي يتم غمره في سائل يبلل الجدار المراد قياس شده السطحي كما في الشكل (15-6) .

ويسبب ان السائل يلتصق بجدران الانبوب الشعري فان سطح السائل يزداد ، ولاختزال سطح السائل الحر فان السائل يرتفع في الانبوب الشعري لكي يعمل على اختزال سطح السائل وتستمر هذه العملية حتى تصبح قوة الشد السطحي للسائل التي تعمل الى الاعلى مساوية الى القوة المساوية الى عمود السائل التي تعمل الى الاسفل .

إذا اعتبرنا  $\gamma$  تمثل قوة الشد السطحي وتمثل القوة العاملة بزاوية قدرها (زاوية التماس) فإن القوة الناتجة من الشد السطحي تساوي:

$$f_1 = 2 \pi r \gamma \cos \theta \quad \dots\dots\dots(6-41)$$

القوة  $f_1$  من المعادلة اعلاه عند استقرار السائل في الانبوب الشعري تتعادل مع القوة الناتجة من وزن عمود الماء في الانبوب الشعري الذي ارتفاعه  $h$  وتساوي  $f_2$ :

$$f_2 = \pi r^2 h \rho g$$

حيث ان  $\rho$  = كثافة السائل بوحدة  $gm/cm^3$   
 $g$  = التعجيل الارضي بوحدة  $Cm/Sec$   
 وعند حصول التوازن بين القوتين فان: —

$$2 \pi r \gamma \cos \theta = \pi r^2 h \rho g$$

$$\gamma = \frac{r h \rho g}{2 \cos \theta}$$

تكون قيمة زاوية التماس لمعظم السوائل التي تبلل جدران الانبوب الشعري تساوي صفراً  $= 0$  لذلك فان  $\cos 0 = 1$

$$\gamma = \frac{r h \rho g}{2} \quad \dots\dots\dots(6-42)$$

واستناداً الى المعادلة (6-42) يمكن قياس قيمة الشد السطحي للسائل من معرفة نصف قطر الانبوب الشعري، كثافة السائل وارتفاع السائل في الانبوب الشعري.

ولأجل الحصول على قيم بدقة أكثر، يجب إجراء التصحيحين لقيم حجم السائل في منطقة التقعر وكثافة الغاز فوق السائل، وتحت هذين التصحيحين فان المعادلة (6-42) تصبح كالآتي:

$$\gamma = \frac{(h + \frac{\gamma}{3})(\rho_1 - \rho_v) r g}{2} \quad \dots\dots\dots(6-43)$$

$$\rho_1 = \text{كثافة السائل.}$$

$$r = \text{نصف قطر الانبوب الشعري.}$$

وتنطبق المعادلة (6-43) ايضاً على السوائل التي لا تبلل جدران الانبوب الشعري كالزئبق ويكون h مقدار الانخفاض بمستوى سائل الزئبق عن مستواه الاصلي في الاناء مقدراً بالسنتيمترات .

وكما هو مبين في الجدول التالي فإن (  $\gamma$  ) ينخفض مقداره بارتفاع درجة الحرارة ويصبح مقداره صفراً عند درجة الحرارة الحرجة .

ان تغير قيمة الشد السطحي للسوائل مع درة الحرارة يمثل بمعادلة رامزي — شيلدرز (Ramsay - Shields equation) التالية :

$$\gamma = \left( \frac{M}{\rho_l} \right)^{\frac{3}{2}} = K (t_o - t - 6) \quad \dots\dots\dots (6-44)$$

Liquid	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C
Water	75.64	72.75	69.75	66.18	62.61	58.85
Ethyl alcohol	24.05	22.27	20.60	19.01	—	—
Methyl alcohol	24.5	22.6	20.9	—	—	—
Carbon tetrachloride	—	26.8	24.3	21.9	—	—
Acetone	26.2	23.7	21.2	18.6	16.2	—
Toluene	30.74	28.43	26.13	23.81	21.53	19.39
Benzene	31.60	28.90	26.30	23.70	21.30	—

جدول (6-4) : تأثير تغير درجة الحرارة على لزوجة السوائل .

$\gamma$  = الشد السطحي للسائل عند درجة الحرارة  $t$ .

$M, \rho_1, t_c$  يمثل الوزن الجزيئي، وكثافة السائل ودرجة الحرارة الحرجة على التوالي.

وحيث ان المقدار  $M/\rho_1$  يمثل الحجم للسائل فان المقدار  $(M/\rho_1)^{3/2}$  يتناسب طردياً مع السطح المولاري للسائل، في حين ان الجزء الايسر من المعادلة أعلاه يمثل طاقة السطح المولارية (Molar Surface Energy). ويمثل  $K$  ثابت يفترض الا بتغير درجة الحرارة.

من خلال تطبيقات معادلة رامزي — شيلدز وجد انها تنطبق على السوائل بحدود ( 30-50 م° ) من درجة الحرارة الحرجة وان الشد السطحي لا يصبح مساوياً الى الصفر عند درجة الحرارة  $(t_c - 6)$ ، في حين تصبح = كمية سالبة عند درجة الحرارة الحرجة، وللتغلب على هذه الصعوبة في تطبيق المعادلة اعلاه، قام العالم كاتاياما (Katayama) بوضع المعادلة التالية :

$$\gamma \left( \frac{M}{\rho_1 - \rho_v} \right)^{\frac{3}{2}} = K' (t_c - t) \quad \dots\dots\dots (6-45)$$

حيث ان  $\rho_v$  = كثافة البخار عند درجة الحرارة  $t$  وعند هذه المعادلة فان مقدار الشد السطحي يصبح مساوياً الى الصفر عندما تكون درجة الحرارة للسائل مساوية الى درجة الحرارة الحرجة  $t = t_c$ .

مثال (6) :

يبلغ الشد السطحي لسائل الكلوروفورم 16.2 داین لكل سم عند درجة الحرارة 20 م°. فاذا كانت كثافتا الغاز والسائل عند نفس درجة الحرارة تبلغان 0.0110 غم / سم<sup>3</sup> و 0.9188 غم / سم<sup>3</sup> على التوالي، وكان نصف قطر الانبوب الشعيرة 0.105 ملم. ماهو ارتفاع السائل في الانبوب الشعري، اذا افترضنا ان زاوية التماس تساوي صفراً ؟

الحل :

$$\gamma = \frac{1}{2} \left( h + \frac{r}{3} \right) (\rho_1 - \rho_v) g r$$



$$16.2 = \frac{1}{2} \left( h + \frac{0.0105}{3} \right) (0.9188 - 0.0110) (980) (0.0105)$$

$$h = 3.46 \text{ cm}$$

## مسائل

1 — ان ضغط بخار الايثانول هو 135.5 ملم زئبق عند 40 م° ويكون 542.5 ملم عند 70 م°. احسب حرارة التبخير المولارية وضغط بخار الايثانول عند درجة حرارة 50 م° ؟

( الجواب :  $\Delta H = 9877$  سعرة / مول  $P = 221.2$  ملم )

2 — فسر مايلي :

1 — القوى الجزيئية في السوائل اعظم منها في الغازات .

2 — الغازات تكون اكثر انضغاطية من السوائل .

3 — وجود علاقة طردية بين الضغط البخاري للسائل وارتفاع درجة حرارة السائل .

3 — وجد ان حرارة التبخير للماء بدرجة 100 م° تساوي 539.9 سعرة / غرام .

اذا علمت ان الفرق بين حجم الماء وحجم بخاره يساوي 1673 سم<sup>3</sup> .

احسب درجة الحرارة التي يغلي فيها الماء عند ضغط 770 ملم زئبق ؟

( الجواب : 100.37 م° )

4 — اذا كان التغير في الضغط البخاري للماء يساوي 27.17 ملم زئبق بين

99.9 م° و 100.5 م° ، وان الحجم النوعي للماء والبخار بدرجة 100 م°

يساوي 1.04 سم<sup>3</sup> و 1674 سم<sup>3</sup> على التوالي . احسب حرارة تبخير الماء

بالجول لكل غم بدرجة 100 م° ؟

5 — اذا كانت قيمة  $dP/dT$  2.72 مم لكل درجة حرارة مطلقة لسائل الماء

بدرجة 100 م° ، احسب حرارة التبخير بالسعرات لكل غرام والجول لكل

كيلو غرام عند درجة الحرارة هذه ؟

6 — كم يستغرق جريان 100 سم<sup>3</sup> من سائل البنزين بدرجة حرارة 25 م° من

خلال انبوب طويل طوله 15 سم وقطره 2.0 ملم تحت رأس ثابت مساوي

الى  $2.0 \times 10^4$  دايين لكل سم<sup>2</sup> ، عساً ان كثافة البنزين عند درجة الحرارة

هذه تساوي 6.10 ملي بوايز (Milipoise) ؟

7 — كرة من معدن معين كثافتها 8.55 غم / سم<sup>3</sup> وقطرها 5.5 سم، سقطت مسافة 22.8 سم خلال سائل كثافته 1.17 غرام / سم<sup>3</sup> خلال فترة زمنية قدرها 12.3 ثانية. ماهي لزوجة هذا السائل بدرجة حرارة 25 م°؟  
(الجواب: 65.5 بواز)

8 — وجدت اللزوجة النسبية لسلسلة من محاليل البولي ستايرين المذاب في سائل التولوين بدرجة 25 م° كما في الجدول التالي:

غم بوليمر لكل 100 سم محلول	0.250	0.5	1.000	2.000
$\eta_r / \eta_0$	1.355	1.782	2.879	6.090

فاذا كان الثابتان K، a في المعادلة (36-6) هما  $3.7 \times 10^{-4}$  و 0.62 على التوالي. احسب الوزن الجزيئي لهذا البوليمر؟

9 — اذا علمت ان معامل لزوجة البنزين بدرجة 10 م° هو  $7.58 \times 10^{-11}$  بواز، ويكون  $5.64 \times 10^{-4}$  بواز بدرجة 30 م°. احسب طاقة تنشيط الجريان ولزوجة سائل البنزين بدرجة 40 م°.

10 — القيت كرة من الصلب قطرها 1.0 ملم وكثافتها 7.87 غم / سم<sup>3</sup> في سائل كثافته 1.26 غم / سم<sup>3</sup> بسرعة اولية قدرها 10 سم / ثا. احسب لزوجة السائل مستخدما معادلة ستوكس؟

11 — يبلغ زمن جريان كمية من الماء خلال مقياس اللزوجة لأوستوالد 1.52 دقيقة ويبلغ الزمن لنفس الكمية من سائل عضوي كثافته 0.8 غم / سم<sup>3</sup> في زمن 2.25 دقيقة. جد لزوجة السائل العضوي النسبية؟

12 — وجد ان ارتفاع الماء في الماء في الاناء عند درجة حرارة 25 م°. جد نصف قطر الانبوب الشعري ثم جد الشد السطحي لسائل الماء؟

13 — غمر انبوب شعري قطره 1.2 ملم في حامض يحتوي على سائل الزئبق بدرجة حرارة 20 م°. وجد ان انخفاض التحذب للزئبق في الانبوب الشعري عن مستوى الزئبق في الحوض يبلغ 0.66 سم. اذا علمت ان كثافة سائل الزئبق بدرجة 20 م° يساوي (غم / سم<sup>3</sup> = 13.6). احسب الشد السطحي للزئبق.

14 — من القيم التالية لغاز ثاني اوكسيد الكربون:

داين / سم	غم / سم <sup>3</sup>	t م
4.5	0.927	0
1.16	0.772	20

احسب درجة الحرارة الحرجة  $t_c$  لغاز  $CO_2$  باستخدام معادلة رامزي ؟  
 15 — ما الفرق بين الزوجة النسبية والزوجة النوعية ، ضع طريقة عملية لإيجاد الوزن الجزيئي لبوليمر معين اذا اعطيت 100 مليغرام من البوليمر وكمية من سائل التولوين . اشرح ذلك مستعيناً بالرسومات التخطيطية ؟

# الفصل السابع

## 1-7 الحالة الصلبة Solid Statae

### المقدمة :

تعتبر الحالة الصلبة من حالات المادة الثلاث اضافة للحالة السائلة والحالة الغازية ، وتختلف عن غيرها كون الجزيئات او الذرات المكونة للجسم الصلب متراسة وموزعة بانتظام وفي مواقع ثابتة .

كما ان قوة التلاصق بينها شديدة مما يفسر الصلادة والكثافة العالية ومقاومتها العالية للتأثيرات الحرارية . كما تراص الجزيئات يعطي حجماً ثابتاً للمادة الصلبة عند ثبوت درجة الحرارة وغير قابلة للانضغاط .

تختلف المادة الصلبة السائلة والمادة الغازية اختلافاً جذرياً تبعاً لاختلاف التركيب الجزيئي وقوى التجاذب بين الجزيئات بسبب اختلاف المسافات بين الجزيئات في الحالة الصلبة عن الحالتين الاخرتين . كما ان لمعظم المواد الصلبة ترتيب هندسي خاص يطلق عليه التركيب البلوري الذي تنتظم فيه ذرات او جزيئات الجسم الصلب على شكل شبكة تدعى الشبكة البلورية (Crystal lattice) لذا فان المسافات تكون ثابتة بين الجزيئات او الذرات وتكون حركتها محدودة بالحركة الدورانية والحركة التذبذبية فقط .

## 2-7 خواص المادة الصلبة

تقسم المواد الصلبة الى مواد متبلورة واخرى غير متبلورة وتتصف المواد الصلبة البلورية بامتلاكها :

1 — درجة انصهار معينة .

2 — حرارة انصهار معينة .

3 — شبكة بلورية معينة .

ان مجرد النظر الى المادة الصلبة وحده لا يكفي تميز المادة الصلبة البلورية عن غير البلورية ، حيث ان المادة الصلبة البلورية عند طحنها تظهر وكأنها غير متبلورة ولكن فحصها تحت المجهر تظهر هذه الدقائق الناعمة على شكل بلورات ذات اشكال هندسية منتظمة .

والمواد الصلبة البلورية كثيرة منها المعادن بشكل عام والاملاح ايضاً . ايضاً اما المواد غير المتبلورة مثل المطاط والزجاج والصمغ الصلب عليها مصطلح امور فس ( لابلوري ) ( Amorphous ) وتعني في اللغة اليونانية عديم الشكل اي ليس لها شكل هندسي منتظم ، او ان الجزيئات توزع بشكل عشوائي كما هو الحال في السوائل ، لذلك تعتبر المواد الصلبة غير المتبلورة سوائل مبردة الى مادون درجة الانجماد .

وتختلف المواد البلورية الصلبة عن المواد غير البلورية ( اللاشكالية ) في عدة نواحي فالمادة النقية البلورية تحتفظ بدرجة انصهار محددة . اما المادة غير البلورية فانها تلين تدريجياً وتزداد ليونتها بزيادة درجة الحرارة بدون او يحدث لها تغير حاد في طورها ، ثم تتحول بعدها الى الحالة السائلة . وتختلف المواد غير البلورية بكونها لا تحتفظ بأوجه محددة ذات زوايا معلومة كما تظهرها المواد البلورية ، وتختلف خواص الوسط البلوري مثل القوى الشديدة والمرونة والتوصيل الحراري والتوصيل الكهربائي ومعامل الانكسار ، وسرعة الذوبان باختلاف الاتجاهات . ويوصف هذا الوسط بأنه غير منتظم الصور ( Anisotropic ) . واذا كانت خاصية معلومة لها نفس القيمة في كل الاتجاهات سميت البلورة منتظمة الصور ( Isotropic ) .

### 3-7 شبكة البلورة

تتواجد الفلزات والمركبات الكيميائية في اشكال بلورية متعددة وتعتمد على نوع وقوة الارتباط بين ذرات البلورة ونوع التجمع والحجم النسبي للايونات او الذرات . وهناك العديد من البلورات المختلفة التي تتميز الواحدة عن الاخرى

بأشكال الزوايا بين أوجهها، كما يمكن التمييز بينها عن طريق دراسة حيود الأشعة السينية التي تمر في البلورة. ورغم أن تنوع أشكال البلورة المتعددة، فكل مركب كيميائي في الحالة البلورية يظهر دائماً نفس الزاوية بين وجهين من أوجه البلورة عند درجة حرارة معينة. وقد استنبط العالم ستينو (Steno) عندما كان يهيء طريقة لمعرفة المواد وتصنيعها لتعيين خواصها البلورية.

تتكون البلورة من تكرار مجموعة أساسية من الذرات في ثلاثة أبعاد، يطلق على هذه المجموعة بوحدة الخلية (Unit cell) وتعتبر الأخيرة أصغر وحدة تعيد ترتيب ذراتها باستمرار ويخطط منتظم خلال الشبكة البلورية ولها الصفات الفيزيائية والكيميائية للمادة الصلبة التي تتألف منها.

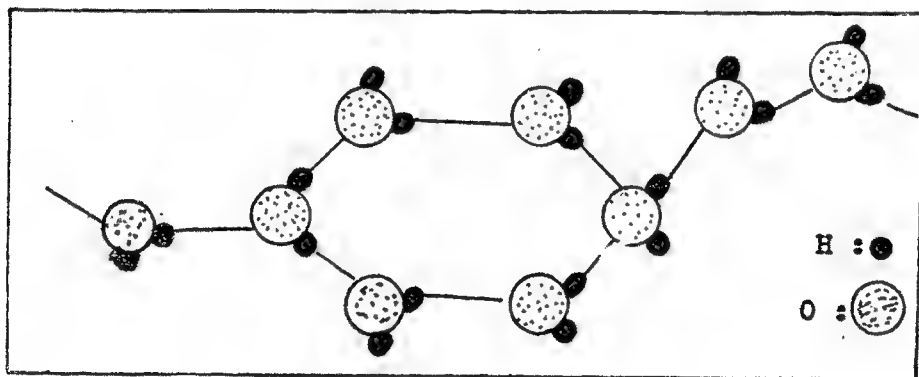
هنالك مواد تختلف كيميائياً بعضها عن بعضها الآخر ولكنها تتواجد في صيغة بلورية صلبة واحدة من ناحية وتوجد مادة صلبة بأكثر من صيغة كما يحدث في حالة الكربون، حيث يوجد هيئة الماس وكرافيت والفحم العادي. ويمكن من تحضير الصيغة الصلبة للماس من وضع حبيبات من الكرافيت في منصهر الرصاص تحت ضغط عال وتبريد هذا المنصهر فجائياً، لذا فإن تعدد هذه الأشكال للمادة الصلبة يدعى متعدد الشكل البلوري (Polymorphism) وهذه الأشكال للمادة الصلبة الواحدة تختلف فيزيائياً ولكنها تتشابه كيميائياً.. ويشارك الكربون بتعدد الأشكال وكذلك الكبريت والفسفور وغيرها من اللافلزات الأخرى.

## 4-7 أشكال البلورات Crystal Forms

تعتمد الأشكال البلورية على نوع قوى الربط بين ذرات أو الجزيئات أو الأيونات كما تعتمد على نوع التجمعات الذرية، والحجم النسبي للأيونات أو الذرات. فإذا كان حجم الأيون السالب مساوياً إلى حجم الأيون الموجب فإن رص هذه الأيونات سوف يكون من نوع الرص المكعب مركزي الجسم (Cubic Body Central) كما هو الحال في بلورة كلوريد السيزيوم. أما إذا كانت نسبة نصف قطر الأيون الموجب إلى نصف قطر الأيون السالب أصغر من نسبتها في كلوريد السيزيوم فإن رص التوبات سيكون من نوع الرص المكعب مركزي الوجه (Face Central Cubic) كما في بلورة كلوريد الصوديوم. أما الصلبة الجزيئية فتكون فيها وحدة الخلية

مؤلفة من جزيئات المادة نفسها مثل بلورات الجليد وبلورات ثاني اوكسيد الكربون الثلجي. وتنشأ قوى الجذب بين هذه الجزيئات من قوة جذب النواة في جزيئة لالكترونات جزيئة اخرى، وتعتمد هذه القوى على نوعية المركب الجزيئي الصلب. فقد تكون هذه القوى على شكل قوى فاندرفال اذا كانت الجزيئات لا تمتلك عزم ثنائي القطب وذات شكل متناظر. او تكون كقوة تجاذب بين عزوم ثنائيات القطب للجزيئات المستقطبة او قد تمثل بقوى الترابط الهيدروجيني عندما يحتوي على اواصر من نوع  $N-H$  او  $O-H$ .

تعتبر قوى التجاذب بين عزوم ثنائيات القطب من اهم القوى التي ورد ذكرها، ويظهر الماء هذا النوع من قوى التجاذب الداخلية بين جزيئاته، حيث يتم التجاذب جزيئات الماء لبعضها عن طريق اقتراب ذرة الاوكسجين ( السالبة ) مع جزيئة ماء اخرى لذرة الهيدروجين ( النهاية الموجبة ) كما موضح في الشكل (1-7):



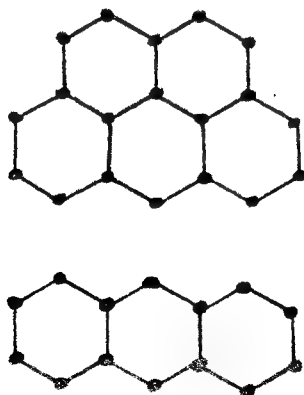
الشكل (1-7) قوى الجذب الداخلية بين جزيئات الماء.

ان هذا النوع من قوى الجذب لجزيئات الماء يجعل ذرة الهيدروجين بمثابة جسر بين ذرتي اوكسجين تعودان لجزيئتين من جزيئات الماء احدهما للجزيئة الاصلية التي ترتبط بها ذرة الهيدروجين والاخرى لجزيئة ثانية من جزيئات الماء وكما هو مبين في الشكل (1-7) ويدعى مثل هذا الارتباط بين ذرة هيدروجين في جزيئة ما وذرة

او كسجين في جزيئة اخرى بالارتباط الهيدروجيني . ان هذا الارتباط يكون ضعيفاً في الماء السائل بسبب حركة الجزيئات الدائمة التي تعمل على تشويش هذه القوى . اما في حالة بلورات الجليد فان جزيئات الماء تنتظم على شكل شبكة من الجزيئات المنتظمة ، وتكون المسافات الفاصلة بينها اكبر مما هي عليه في الحالة السائلة ، ويفسر هذا بأن كثافة الجليد اقل من كثافة الماء .

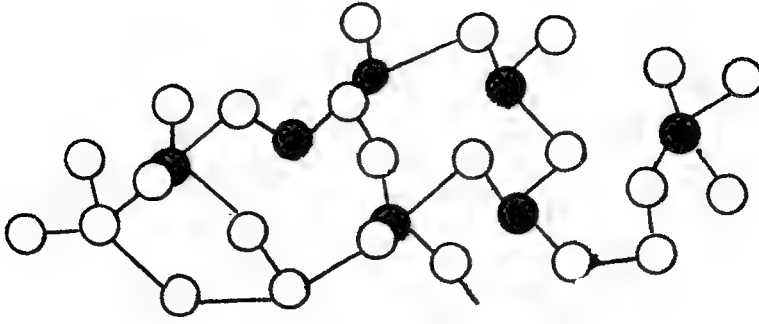
اما القوى الموجودة بين جزيئات ثاني اوكسيد الكربون الصلب فهي من نوع قوى فاندرفال الضعيفة بسبب ضعف قطبية هذه الجزيئات اذا ماقورنت بجزيئات الماء ، لذا فانه يتسامى في حالته الصلبة .

للبلورات التي ترتبط ذراتها بأواصر تساهمية شبكة من الذرات يصعب فيها التمييز بين الذرات او الجزيئات بصورة منفردة في التركيب البلوري ، ومن امثلة هذا النوع من البلورات الماس والكاربورايدوم وكبريتيد السيليكون والكرافيت . ولهذا تعتبر بلورة الماس من اصلب المواد ، الأمر الذي يدفع الناس الى استعمالها في قطع الزجاج والمعادن ، اذ ترتبط ذرة الكربون فيها بأربع اواصر تساهمية مع اربع ذرات كربون اخرى ، حيث تمثل فيه رؤوس شكل مجسم رباعي الوجوه (Tetrahedral) ، ويشارك الكترونان في كل اصرة تساهمية من نوع (C - C) وتتمركز كثافتهما الالكترونية بصورة محكمة بين ذرتي الكربون :



الشبكة البلورية للكرافيت





الشبكة البلورية للماس

### الشكل (2-7): ترتيب الذرات في الشبكة البلورية

وبصورة عامة يمكن تلخيص قوى الربط في ذرات البلورات الى الانواع التالية :

#### 1 — اواصر ايونية Ionic Bonds

تتكون بلورة NaCl من ايونات كل من  $Na^+$  و  $Cl^-$  وهناك العديد من الادلة القوية على هذا التركيب من الربط الكهروستاتيكي، منها ان منصهر NaCl يوصل الكهربائية، ومن الطبيعي الافتراض بأن حدوث التوصيل الكهربائي في المنصهر يكون بسبب وجود الايونات المشحونة، وقد وجد ان املاح NaCl واملاح اخرى من هذا النوع اتفاق المسافة بين الايونات في الشبكة البلورية مع نصف قطر الايون اكثر مما تتفق مع نصف قطر الذرة، وهذا مما يؤكد تكون الشبكة البلورية من الأيونات .

ولقوة التجاذب بين هذه الايونات اثر كبير في مقاومة الانزلاق لبعض الذرات بجانب البعض الاخر، لكن اذا ما استخدمت قوة خارجية كافية لتحريك المستويات قليلاً لازاحة مواضع الايونات الموجبة — الايونات السالبة، فان القوى تضعف كثيراً. فبينما تكون البلورة الايونية قوية فمن المحتمل ان تكون هشة وان مرونتها صغيرة جداً.

## 2 — الأواصر التساهمية Covalent Bonds

تتكون هذه الروابط من مساهمة الكترونين في تكوين الاصرة، والبلورات التي تتكون شبكيتها من هذا النوع من الارتباط وفي ثلاثة ابعاد قوية وصلبة وذات نقطة انصهار عالية كما في بلورة الماس وعلى خلاف الاواصر الايونية، فان الاواصر التساهمية لها اتجاهات محددة غير ان البلورات التساهمية تشبه البلورات الايونية في انه لا توجد مجموعات كبيرة من الذرات تختلف عن الوحدات الاساسية التي تتكون منها الشبكة بحيث يمكن اعتبار البلورة الكاملة كالجزء.

## 3 — اواصر فاندرفال

تمتاز هذه الاواصر الموجودة في الشبكة البلورية بأنها ذات قوى ربط ضعيفة، فان البلورات الجزيئية تكون رخوة كما ان نقطة انصهارها منخفضة نسبياً كما في اغلب المركبات العضوية وبلورات  $CCl_4$  وثاني اوكسيد الكربون الثلجي.

## 4 — اواصر هيدروجينية Hydrogen Bonding

من المعروف في كثير من البلورات ان ذرة H قد تنجذب بقوى كبيرة نوعاً ما بذرتين بدلاً من ذرة واحدة، بحيث يمكن اعتبار وجود قوتين تشد ذرة الهيدروجين احدهما الاصرة الاعتيادية والاخر اصرة هيدروجينية. تدخل الاواصر الهيدروجينية في كثير من البلورات العضوية وغير العضوية وفي تركيب بلورات الثلج وهي ضعيفة نسبياً.

## 5 — اواصر فلزية

تتكون الشبكة البلورية من نوع واحد من الذرات ويكون ترتيب الذرات على شكل رص متقارب للذرات ويكون محكماً، وهنالك نوعان من رص الذرات هما:

(أ) الرص المكعب الضيق.

(ب) الرص السداسي الضيق.

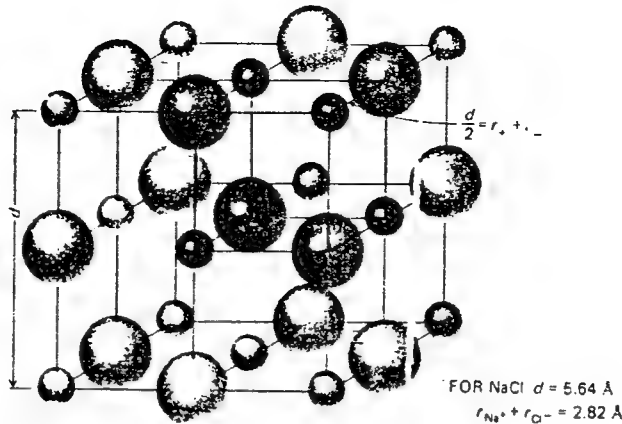
حيث يتبلور النحاس والفضة والخرصين في هيئة الرص من النوع الاول ويتبلور التنكستن من رص النوع الثاني.

ومن مميزات هذا النوع من الارتباط المتناسك القوى ان الفلزات موصلة جيدة للكهربائية وقابلة للطرق ووجود بريق فلزي .

## 5-7 المنظومات البلورية

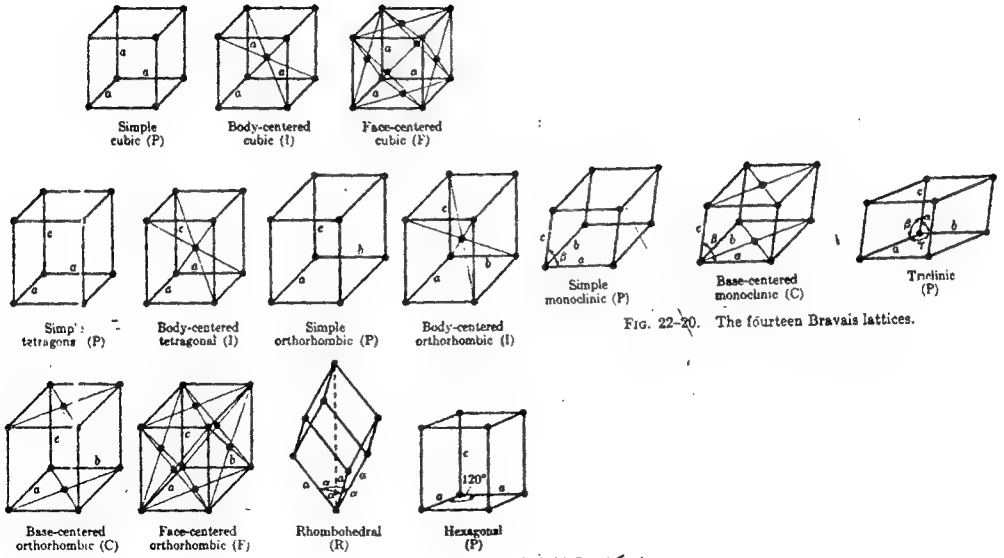
ان انتظام التركيب البلوري يدل على فكرة شبكية الفراغ ، حيث ان بلورة (NaCl) كلوريد الصوديوم تتكون من شبكية بالابعاد الثلاثة لايون الصوديوم متداخلة مع الشبكية الفراغية لأيون الكلوريد وان الشبكية الفراغية للملح كلوريد الصوديوم تتكون من تداخل شبكيات  $Na^+$  و  $Cl^-$  . تماثل الشبكية المتحدة يحدد تماثل البلورة ككل .

الشبكية الفراغية للبلورة كما في NaCl متكونة من شكل سداسي ثلاثي الابعاد كما في الشكل (3-7) ، يسمى بوحدة الخلية :



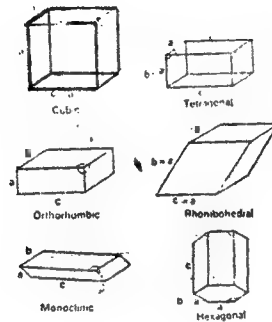
الشكل (3-7) : الشبكية الفراغية لبلورة كلوريد الصوديوم .

ان ابعاد وحدة الخلية على المحاور الثلاثة يحدد مظهر البلورة الخارجي والذي على اساسه تم تصنيف الشبكات الفراغية الى اربعة عشر فراغاً كما في الشكل ادناه :



الشكل (4-7) أدناه:

ان تقسيم الشبكات الفراغية الى اربعة عشرة شبكة فراغية، ادى الى امكانية الخروج بتقسيم للمنظومات البلورية اخذين بنظر الاعتبار التماثلية والمحاور الاحداثية المستخدمة. وقد قسمت المنظومات البلورية الى سبع منظومات وكما في الشكل (4-7) ادناه:



الشكل (4-7): المنظومات البلورية السبع.

المنظومة	المحاور	الزوايا	تركيب البلورة
المكعب	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	NaCl, Ag
رباعي الزوايا والاضلاع	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	MgF <sub>2</sub> القصدير الابيض
معيني مستقيم	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	HgCl <sub>2</sub> الكبريت المعيني
احادي الميل	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\gamma=90^\circ, \beta=120^\circ$	الكبريت احادي الميل
السداسي	$a=b=c$	$\alpha=\gamma=90^\circ, \beta=120^\circ$	Mg كرافيت
موشور سداسي منتظم	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	كالسيت Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
الثلاثي الميل	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma=90^\circ$	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O

الجدول (1-7) : المنظومات البلورية السبع

## 6-7 السعة الحرارية للمواد الصلبة

تعتبر وحدة بلورة العنصر من أبسط تراكيب الحالة الصلبة، على أن يحتوي بلورة العنصر على ذرة واحدة عند كل نقطة من نقاط الهيكل البلوري الصلب. وعلى افتراض أن كل ذرة تسلك كمهتز توافقى بسيط يمتلك ثلاث درجات من الحرية موزعة على المحاور (x, y, z) فإن السعة الحرارية عند ثبوت الحجم  $C_v$  تساوي:

$$C_v = 3R \quad \text{.....(7-1)}$$

حيث (R) يمثل مساهمة كل درجة حرارية على أحد المحاور الثلاثة.

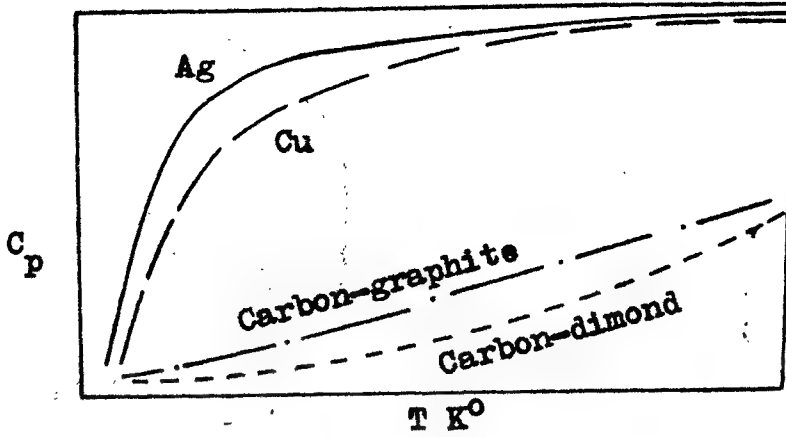
يعتبر قانون دولنغ وبيت  $Dulong \text{ and } Pitts \text{ Law}$  من القوانين التي استخدمت في تعيين الأوزان الذرية للعناصر والذي ينص على أنه، عند درجة حرارة الغرفة، يكون حاصل ضربي الحرارة النوعية تحت الضغط الثابت في الوزن الذري للمادة الصلبة = مقداراً ثابتاً يدعى  $C_p$  ويساوي:

$$C_p = 6.4 \text{ Cal / K.gm - atom}$$

وبالرغم من أن العديد من العناصر تحقق هذه القاعدة، حيث تتراوح قيم  $C_p$  بين 6.1-6.8 بوحدة (سعة / درجة. غرام — ذرة)، إلا أنه يعرف عدد غير قليل من الانحرافات الكبيرة عن هذه القاعدة كما في العناصر الخفيفة ولاسيما اللافلزات مثل للبورون (سعة / درجة غرام — ذرة  $C_p = 2.65$  وللبريليوم 3.93 وللسيليكون 4.78 ولللماس 1.46).

تحتفظ السعة الحرارية عند ثبوت الحجم  $C_v$  على قيم ثابتة تقريباً وبشكل أفضل وتساوي في العديد من العناصر التي يزيد عددها الذري عن  $C_v = 3R = 5.9 = 0.09 (19)$  (سعة / درجة غرام — ذرة).

ولذا فإن السعات الحرارية للعناصر الصلبة الواقعة في مقدمة الجدول الدوري اخفض قيمة من المقدار المذكور اعلاه (5.9 0.09). وبذلك تكون اخفض من القيم المعطاة حسب قانون دولنك وبيت. وبناء على هذه القاعدة فإن قيم السعات الحرارية للمواد الصلبة لا تعتمد على التغير في درجات الحرارة، ولكن الملاحظ أنها تتضاءل عند خفض درجة الحرارة وكما هو مبين في الشكل (5-7):



الشكل (5-7) السعات الحرارية للعناصر مع التغير في درجة الحرارة المطلقة

حيث يلاحظ ان قيمة السعة الحرارية للعناصر المبينة في الشكل تقترب من الصفر عند الصفر المطلق، وبالنسبة للعناصر مثل الفضة والنحاس فان قيم السعة الحرارية ترتفع فجائياً مع ارتفاع درجة الحرارة المطلقة حتى تصل مقداراً مساوياً الى  $3R = 5.97$  بوحدات سرعة / مول .

اما اللافلزات مثل الكربون السيليكون فانه تسلك سلوكاً مغايراً، حيث يكون ارتفاع السعة الحرارية مع ارتفاع درجة الحرارة المطلقة ارتفاعاً تدريجياً ولا تصل قيمتها الى  $(3R)$  الا عند الدرجات الحرارية المرتفعة . وفي حالة الكربون فان قيمة السعة الحرارية لا تصل الى  $(3R)$  الا عند درجة حرارة  $(1300\text{ K})$  .

وبناءً على نظرية انيشتاين التي اعطت معالجة ميكانيكية كمية للسعة الحرارية لبلورة مثالية، والتي افترضت ان كافة المهتزازات لها نفس التردد، فان منحنيات السعة الحرارية  $(C_v)$  تجاه الحرارة المطلقة لعناصر مختلفة يجب ان تتطابق عند تقسيم درجة الحرارة المطلقة  $(T)$  بما يسمى درجة الحرارة المميزة  $\theta$  والتي تختلف باختلاف العناصر، حيث تتراوح بين  $100 - 400\text{ K}$  للمواد الصلبة التي تقترب قيم سعاتها الحرارية من  $(6 \text{ سرعة / درجة . مول})$  وعند الدرجات الحرارية العالية . اما بالنسبة لبلورات الماس فانه تساوي  $(1860\text{ K})$ ، ويعزى هذا الارتفاع في قيمة  $\theta$  الى ان طيف تردد بلورة الماس يمتد الى ترددات عالية لا تنشط بأكملها عند درجات الحرارة المنخفضة . اما بالنسبة للفلزات كالنحاس والفضة، والتي تعتبر فلزات لينة ولها

درجة انصهار واطئة نسبياً، فإن  $\theta$  تكون قيمتها واطئة وتساوي 315 K ، 215 K على التوالي ، حيث تمتلك قوى ذرية داخلية ضعيفة ، بينما تكون هذه القوى عالية في بلورة الماس .

وبسبب ضعف القوى الذرية الداخلية للعناصر كالنحاس والفضة فإن لذبذباتها الهيكلية (Lattice Vibration) ترددات واطئة والتي تنشط كاملة في درجة حرارة اقل من درجة حرارة الغرفة .

في (1912) وضع العالمان بيتر وديباي (Peter - Debye) نظرية اكثر نجاحاً من نظرية انيشتاين والتي افترضت ان المادة الصلبة تمتلك ترددات تتراوح بين الصفر وحتى التردد  $\nu_m$  وتمثل درجة الحرارة المميزة بالمعادلة ادناه :

$$\theta_D = \frac{h \nu_m}{k} \quad \dots\dots\dots(7-2)$$

$\theta_D$  درجة حرارة ديباي المميزة  
 $\nu_m$  تردد المادة الصلبة ،  $h$  = ثابت بلانك ،  $k$  = ثابت بولتزمان

وهكذا افترضت نظرية بيتر — ديباي وجود ترددات مختلفة للعناصر المختلفة ، في حين افترضت نظرية انيشتاين وجود تردد واحد ، كما ان السعة الحرارية  $C_v$  تقترب من الصفر عند الصفر المطلق ، وتصبح  $C_v = 3R$  عند درجات حرارة اعلى ، وان درجة حرارة ديباي المميزة تتناسب طردياً مع  $(T^3)$  وفق المعادلات التالية :

$$C_v = \left( \frac{12 R \pi^4}{5 \theta_D^3} \right) T^3 = a T^3 \quad \dots\dots\dots(7-3)$$

وبذلك فان :

$$C_v \propto T^3 \quad \dots\dots\dots(7-4)$$

وتفيد المعادلة (7-3) في حسابات قيم السعات الحرارية لدرجات اقل من 15 K حيث يصعب الحصول على قيم تجريبية .

قام العالم انيشتاين بحساب السعات الحرارية للمواد الصلبة من نظرية



الكم، وتمثل المعادلة التالية السعة الحرارية للمادة الصلبة البلورية الحاوية على عدد ١ افكادروا من الذرات وكما يلي :

$$C_v = 3R \left( \frac{h \nu}{kT} \right)^2 \cdot \frac{e^{h \nu / kT}}{(e^{h \nu / kT} - 1)^2} \quad \dots\dots\dots(7-5)$$

حيث تردد الذبذبة

اما السعات الحرارية الجزيئية للمواد المعقدة في الحالة البلورية فتساوي مجموع السعات الحرارية الذرية للعناصر الداخلة في تركيب المادة الصلبة وانها قيم قابلة للجمع، وعلى سبيل المثال، اذا كان جزيء مالمادة مؤلفة من n من الذرات فان سعته الحرارية تساوي :

$$C_v = 5.9 n \quad \dots\dots\dots(7-6)$$

وكما هو معروف، من الصعوبة قياس السعة الحرارية للأجسام الصلبة مع بقاء حجمها ثابتاً، ولهذا السبب يتم حساب  $C_v$  من القيم المستخرجة لـ  $C_p$  في حالات اخرى، وفي الاجسام الصلبة يمكن استعمال القيم النظرية لـ  $C_v$  في ايجاد قيمة  $C_p$ . ويكون الفرق ( $C_p - C_v$ ) كمية صغيرة جداً وهو عادة اقل من ( سرعة / غرام — ذرة درجة 10.5 n )، (Cal / k.gm - atom) حيث n = عدد الذرات المؤلفة للجزيء الصلب المحسوب من الصيغة الاجمالية.

وباختصار يمكن حساب قيم  $C_p$  من العلاقة التالية :

$$C_p = 6.2 n \quad \dots\dots\dots(7-7)$$

والقيم الواردة ادناه تمثل السعات الحرارية الذرية لبعض العناصر التي لها سعة حرارية اقل من 6.2 وكما يلي :

S	P	F	O	Si	B	H	C
5.4	5.4	5.0	4.0	3.8	2.7	2.3	1.8

C<sub>p</sub> Cal / K. mol

ويمكن حساب  $C_p$  للمركب  $\text{CaCO}_3$  كالآتي :

$$C_p = 3 \times 4 \text{ ذرات اوكسجين} \quad C_p = 1.8$$

$$\text{ذرة كاربون واحدة} \quad C_p = 6.2$$

$$\text{ذرة كالسيوم واحدة}$$

لذلك فان  $C_p$  لكاربونات الكالسيوم تساوي (20) (Cal / K. Mol)

$C_p = 14.6 \text{ cal/k mol.}$  في حين تساوي القيمة التجريبية عند درجة حرارة 25 C

ومع ذلك فان الاختلاف بين القيم التجريبية والنظرية لايتجاوز اكثر من 10% - 12% .

عند درجة الحرارة المنخفضة جداً، فان الجزء المكون للسعة الحرارية  $C_p$  الناجم عن طاقة اهتزاز الذرات والايونات المكونة للشبكة البلورية يصبح صغيراً جداً ولايتجاوز  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ (Cal / k - gm - atom)}$  . ففي درجات الحرارة هذه يظهر في البلورات الفلزية القسم الاخر المكون للسعة الحرارية والذي يعتمد على حركة الالكترونات لذلك فان :

$$C_p = C_p \text{ vib} + C_p \text{ elec.} \quad \dots\dots\dots(7-8)$$

حيث ان

$C_p \text{ vib}$  السعة الحرارية الناتجة من طاقة اهتزاز الذرات .

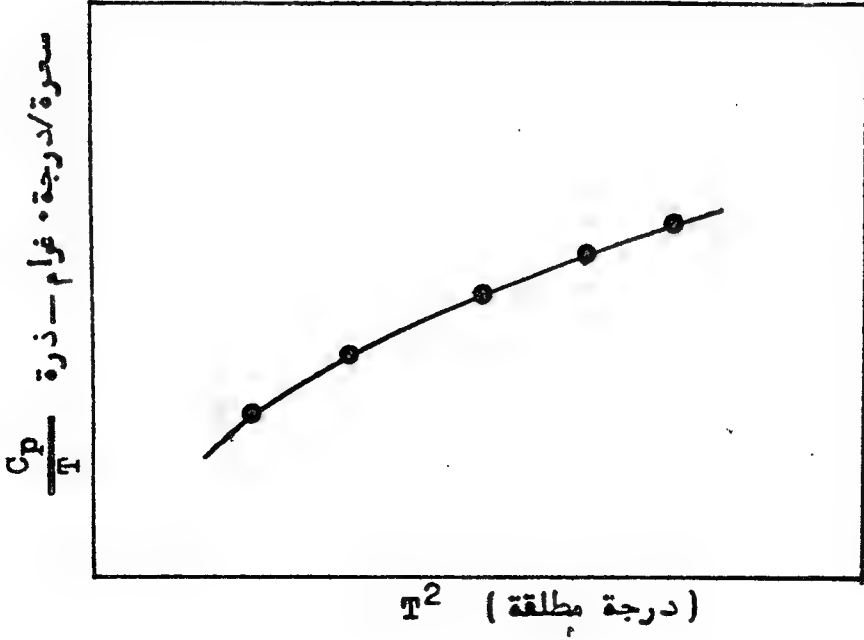
$C_p \text{ elec}$  السعة الناتجة من حركة الالكترونات .

وحيث انه بالامكان تعيين هذين الجزئين من  $C_p$  كل على انفراد وذلك لاختلاف ارتباط كل منهما بدرجة الحرارة اختلافاً كبيراً، حيث ان  $C_p \text{ vib}$  تزداد كلما ارتفعت درجة الحرارة ويتناسب طردياً مع الدرجة الثالثة لدرجة الحرارة، اما  $C_p \text{ elec.}$  فتتناسب طردياً مع الدرجة الاولى لدرجة الحرارة لذلك فان :

$$C_p = C_p \text{ vib} + C_p \text{ elec.} = \beta T^3 + \gamma T \quad \dots\dots\dots(7-9)$$

$$\frac{C_p}{T} = \beta T^2 + \gamma \quad \dots\dots\dots(7-10)$$

حيث  $\gamma$  و  $B$  تساوي كمية ثابتة، والمعادلة (10-7) يمكن رسمها بيانياً كما يلي :



الشكل (6-7) رسم علاقة  $T^2$  مقابل  $\frac{C_p}{T}$

من الرسم البياني اعلاه يكون ميل الخط المرسوم  $B =$  وتقاطعه مع المحور الصادي  $\gamma$ .

وهذه العلاقة (10-7) تسري على الفلزات ذات التوصيلية العالية مثل (Al و Ga و pb و Sn) بالقري من درجة الحرارة المطلقة  $0^\circ K$ . ولا يقتصر انطباقها على الفلزات، بل على المركبات والسبائك مثل  $VB_2$  و  $VN$  و  $GeTe$  و  $SrTiO_3$ .

## اسئلة الفصل السابع

- 1 — صنف كلا من المواد الصلبة الاربعة الاتية بالنوع الجزئي التساهمي الايوني او الفلزي :  
( أ ) كلوريد الرديوم  
( ب ) النفثالين  
( ج ) كلوريد السيزيوم  
( د ) كارييد التنسكستن
- 2 — جد السعة الحرارية الجزئية للمركبات ادناه ، استناداً الى طريقة حساب السعات الحرارية الجزئية :  
( أ ) كاربونات المغنيسيوم  
( ب ) كاربونات النحاس
- 3 — كيف تقارن السعة الحرارية عند ثبوت الضغط في الحالات التالية :  
( أ ) الحالة الصلبة والحالة الغازية .  
( ب ) الحالة الصلبة والحالة السائلة .  
( ج ) الحالة السائلة والحالة الغازية .
- 4 — اعط مثالين لبلورات تمتلك الاواصر التالية :  
( أ ) اصرة ايونية  
( ب ) اصرة فلزية  
( ج ) اصرة تساهمية  
( د ) اصرة جزيئية
- 5 — مالفرق بين البلورات التامة والبلورات غير التامة ؟ وما علاقة ذلك بالسعة الحرارية للبلورة ؟
- 6 — للكبريت صورة عديدة ، بعبارة اخرى له صور بلورية ، واخرى غير بلورية لماذا ؟ وهل بالامكان تحويل الصور البلورية الى صور اخرى غير بلورية ؟ وكيف ؟
- 7 — تحتفظ بلورة الماس بسعة حرارية واطمة نسبياً حتى في درجات الحرارة العالية ؟ اذا ماقرنت ببلورة النيكل الصلب ، لماذا ؟

# الفصل الثامن

## اتزانات الاطوار Phase Equilibria

### 1-8 اتزانات الاطوار

يعرف الطور بأنه ذلك الجزء من المنظومة المتجانس في التكوين الكيميائي والخواص الفيزيائية وينفصل عن باقي الاجزاء المتجانسة الاخرى من المنظومة بواسطة حدود سطحية واضحة. تمثل المنظومة الغازية طوراً واحداً، وهناك طور سائل واحد وطور صلب واحد. كما ان هناك اطوار متعددة للسوائل عندما لا يتم امتزاجها وكذا للمواد الصلبة التي اذا تعددت صورها عند اواجدها مع بعضها البعض يقال بأنها متعددة الاطوار. فعندما تكون هذه الاطوار متواجدة بصورة متوازنة مع بعضها البعض تكون جهودها الكيميائية متساوية، وهناك معايير اخرى قيد الجهد الكيميائي للتوازن بين الاطوار مثل درجة الحرارة والضغط. وتعرف مثل هذه الخواص المركزة كما ورد ذكرها في الفصل الاول ضمن تساوي تغيرات الانتروبي تتساوي درجات الحرارة. ومن تساوي طاقات هيلمهولتز الحرة تتساوى الضغوط، ومن تساوي طاقات كبس الحرة تتساوى الجهود الكيميائية بالمقابل.

هناك انواع مختلفة من توازنات غير متجانسة مثل التبخر والتسامي والانصهار والانتقال من طور صلب الى آخر، وقابلية ذوبان المواد الصلبة والسوائل والغازات في بعضها البعض، وضغط بخار المحاليل، وتوزيع المذابات بين الاطوار. وقد تم التوصل الى هذه الحالات بطرق مناسبة. وهذه الطرق تشمل معادلة كلايرون وكلوذوس — كلايرون وقانون راؤولت وقانون هنري وثوابت التوازن وقانون التوزيع. ووجد بأنه من الممكن معالجة كل التوازنات غير المتجانسة من وجهة نظر موحدة تعتمد على مبدأ يطلق عليه قاعدة الطور.

## قاعدة الطور Phase Rule

هناك بعض المفاهيم التي تستند عليها هذه القاعدة ينبغي معرفتها قبل الخوض في الموضوع وهي كالتالي:

### ( أ ) درجات الحرية Degrees of freedom

يمكن تعريف درجات الحرية ( ويطلق عليها أحياناً بالتغاير Variance ) بأنها اصغر عدد من المتغيرات المستقلة مثل الضغط ودرجة الحرارة والتركيز والتي يجب معرفتها لغرض تحديد المتغيرات الباقية للمنظومة بصورة كاملة، ولفهم مغزى درجات الحرية للمنظومة نأخذ مثلاً كثافة الماء السائل التي لا بد من تحديد ومعرفة الظروف التي تقاس عندها كدرجة الحرارة والضغط، فكثافة الماء بدرجة حرارة 10 م° وضغط 1 جو تكون 0.99973 غم/سم<sup>3</sup> فالتصریح بكميات كثافة الماء عند درجة 10 م° بدون ذكر الضغط لاتحدد حالة الماء اذ يمكن ان يكون الماء بدرجة حرارة 10 م° في اي ضغط، فعليه لاعطاء الوصف الكامل لحالة الماء ينبغي تعيين متغيرين بالنسبة للطور السائل ويقال بانه يمتلك درجتى حرية او ثنائى التغاير. وعندما يتواجد الماء السائل والجليد معاً في حالة توازن فيتم تعيين درجة الحرارة والكثافتين بواسطة الضغط فقط. فعندما نقول ان الجليد والماء في توازن عند ضغط 1 جو فلا يمكن ان تكون درجة الحرارة غير درجة الصفر المئوي وكثافتاهما معروفتان. وفي مثل هذه الحالة توصف المنظومة بمتغير واحد او بدرجة حرية واحدة ويقال للمنظومة بانها احادية التغاير Monovariant.

### 2 — عدد المكونات Number of components

ويعرف بانه اصغر عدد من اصناف المكونات المستقلة المتغيرة التي تكتب بدالاتها معادلات الصيغ المعبرة عن تكوين كل من الاطوار المحتمل حصولها. لنأخذ مثلاً منظومة الماء، حيث يمكن ان تتواجد في الطور السائل والصلب والبخار وتكون مكونة كل طور هي H<sub>2</sub>O، فهي اذن منظومة احادية التكوين، كذلك يمكن القول بان اصغر عدد للمكونات الضرورية لوصف تكوين كل اطوار منظومة ملح الطعام — الماء هو اثنان وان المنظومة ثنائية التكوين، كذلك الحال بالنسبة لمنظومة

كبريتات الصوديوم — الماء فكل اطوارها الممكن وجودها هي اللامائية والتي تحتوي على سبع جزيئات من ماء التبلور او عشرة او محاليل  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  في الماء او الجليد او البخار. هذا بالنسبة للمكونات التي لا يحصل فيها تفاعل. اما في حالة التفاعل الذي يؤدي الى التوازن فتكون الحالة اكثر تعقيداً. فلو اخذنا التفاعل مثل :



فتكون عندئذ تراكيز  $A$  و  $B$  و  $C$ ، و  $D$  غير مستقلة عن بعض عند حالة التوازن. فدالة كبس الحرة للمواد المتفاعلة تساوي دالة كبس الحرة للمواد الناتجة، وعليه هناك معادلة اخرى تختص بالجهود الكيميائية وهي :

$$\mu_A + \mu_B = \mu_C + \mu_D$$

يجب تحقيقها وتكون مقيدة للحرية، حيث يصبح لها عدد درجات الحرية منقوصاً واحداً او بمقدار  $r$  اذا كان هناك  $r$  من التفاعلات في حالة التوازن. وبهذا الصدد ينبغي كذلك تحديد علاقة صنف المكونة بالتوازن. اذ ان مجرد احتمال وجود التوازن لا يكفي، فمثلاً اذا كانت منظومة مكونة من  $\text{H}_2$  و  $\text{O}_2$  وبخار الماء فهي اذن منظومة ثلاثية التكوين تحت الظروف الاعتيادية وحتى ولو كانت الاصناف الثلاثة تحت ظروف اكثر تطرفاً فهي ما تزال تكون متوازنة. والسؤال هنا هل ان كل اصناف المكونات تحتسب كعدد مكونات لغرض ايجاد التغيرات؟ ونفس الشيء بالنسبة لمنظومة مكونة من  $\text{CO}_2$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{MgCO}_3(s)$  او  $\text{CaCO}_3(s)$ ،  $\text{CaO}(s)$ ،  $\text{CO}_2(s)$  فلا بد من التمييز بين عدد اصناف المكونات وعدد المكونات التي تدخل في حساب قاعدة الطور. فبالنسبة لمنظومة  $\text{H}_2$ ،  $\text{O}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  اذا كانت المكونة كلها تتواجد في الطور الواحد فيكون عدد مكوناتها ثلاثة. وفي حالة الكربونات يكون  $\text{CO}_2$  الصنف الوحيد الذي يتواجد في الحالة الغازية في التفاعل الذي يتجه نحو التوازن، فيكون عدد المكونات اثنان. ولكن لو اخذنا التفاعل  $\text{NH}_4\text{Cl} \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl}$  فان عدد المكونات يكون واحداً لان  $\text{NH}_4\text{Cl}$  يتواجد في الطورين.

هناك ضرب آخر من المنظومات مثل الماء والكحول وحيث يمكن ان يتكون ثنائي الجزيئة ( الدايمر ) ويمكن اعتبار عدد اصناف هذه المنظومة ثلاثة، ولكن عدد المكونات اثنان. وبالعكس في حالة الملح  $\text{NaCl}$  في الماء وحيث يتواجد الملح

بشكل ايونين  $Na^+$  و  $Cl^-$  فيكون عدد الاصناف ثلاثة، ولكن عدد المكونات اثنان .

من كل ما تقدم يمكن تحديد عدد المكونات من العلاقة التالية :

$$C = s - 1$$

حيث  $s$  عدد الاصناف التي تدخل في التفاعل او معادلات التوازن معينة والضغط الذي يثبت بصورة تلقائية، يوصف هذا النظام بغير المتغير .

## 2-8 اشتقاق قانون الطور

اذا اتخذنا منظومة تحتوي على عدد من الاطوار  $P$  وعدد من المكونات  $C$  .  
واذا افترضنا ان الطور يحتوي على مكونات عددها  $C$  . فان محتوياته يمكن التعرف عليها بـ  $(C-1)$  من التراكيز . مثلاً اي بواحد اقل من العدد الكلي لان التراكيز المجهولة يمكن التعرف عليها من معرفة العلاقة وهي  $\sum x_i = 1$  حيث  $x_i$  تمثل الكسور المولية للمكونات  $i$  . لذلك فان مجموع التراكيز التي يجب معرفتها للمنظومة هو  $(C-1)$  لكل طور او  $P(C-1)$  من التراكيز، وهناك متغيران اخران يجب التعرف عليهما وهما الضغط ودرجة الحرارة ولذلك فان المجموع الكلي لعدد المتغيرات يكون  $2 + P(C-1)$  . وفي حالة اعتبار الضغط او درجة الحرارة ثابتاً فان عدد المتغيرات او درجات الحرية يكون  $1 + P(C-1)$  . ومن ناحية اخرى في حالة وجود تأثير اخر كان يكون المجال المغناطيس فان عدد المتغيرات او عدد درجات الحرية يكون  $3 + P(C-1)$  .

الان يجب اعتبار حالات التوازن بين الاطوار، حيث يتساوى الجهد الكيميائي  $\mu$  لكل مكونة اي ان  $\mu = (\text{الطور } 1) = \mu_i = (\text{الطور } 2)$  .  
 $\mu_i$  (الطور  $P$ ) ومع وجود عدد المكونات الذي سيكون كل منها  $C$  في حالة توازن بين هذه الاطوار البالغ عددها  $P$  فان هناك  $(P-1)$  من التوازنات لكل مكونة، عليه يكون عدد علاقات التوازن لكل المكونات  $C(P-1)$  . وعلى سبيل المثال ففي حالة وجود طورين وفي حالة وجود علاقة توازن لكل مكون لذلك فانه توجد  $C(P-1)$



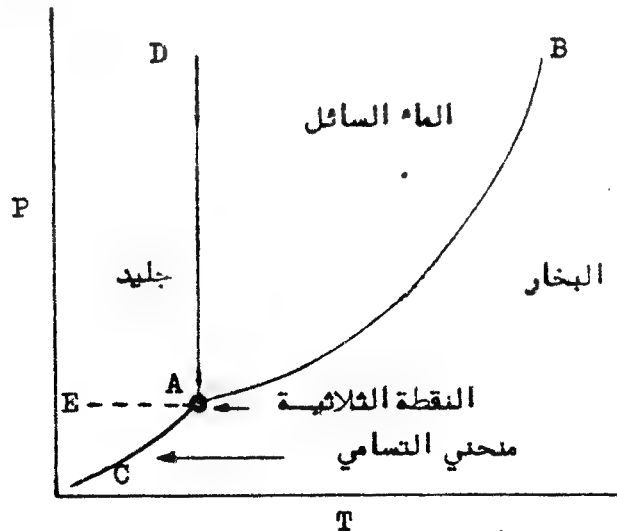
علاقة توازن لذلك فان درجات الحرية يكون مجموع عدد المتغيرات مطروحاً منه مجموع عدد التوازنات والعلاقات بين هذه المتغيرات . وان عدد المتغيرات او درجات الحرية  $F$  يمثل عدد المتغيرات التي يجب معرفتها لاجل تعريف النظام كلياً ، لذلك فانه في حالة نظام ، والذي فيه تكون درجة الحرارة والضغط والتراكيز هي المتغيرة فقط فان  $F$  يكون :

$$F = [P(C-1) + 2 - C(P-1)] = C - P + 2 \quad \dots\dots\dots(8-2)$$

ينبغي قبل دراسة اية منظومة حساب المتغيرات الذي يعطي الابعاد الفراغية لها وعلى ضوءها يمكن وضع مخططات التوازن كأن تكون احادية او ثنائية التكوين ويمكن ان نستقريء من المعادلة (8-2) انه كلما كان عدد المكونات اكبر كلما ازداد عدد درجات الحرية او المتغيرات وكلما ازداد عدد الاطوار كلما كان عدد المتغيرات اقل .

### 3-8 مخطط الطور لمنظومة احادية التكوين

#### Phase diagram for one-component system



الشكل (1-8)

ان النقاط على امتداد الخط AB، تمثل الحالة التي يكون كل من الماء والبخار في حالة توازن. عند الضغط ودرجة الحرارة عند النقاط اسفل الخط فان السائل يكون قد تبخر كلياً وتكون هذه المنطقة منطقة بخار. اما في المنطقة الواقعة اعلى الخط AB فان البخار يتحول كلياً الى سائل. وتمثل النقطة B الحد الاعلى لمنحنى التبخر. وهي النقطة الحرجة التي نحصل عليها عند درجة 374° وضغط 218 جو للماء. فوق درجة الحرارة هذه يكون من الصعب تمييز طوري السائل والبخار عن بعضهما. اما الخط AC فهو منحنى التسامي، حيث يقع الجليد فوق هذا الخط والبخار تحته. وهنا على امتداد الخط فقط تكون حالة توازن بين البخار والجليد الصلب. وهناك المنحنى AE المنقط على امتداد المنحنى AB يمثل حالة يبرد الماء فيها بصورة خارقة (Super cooled). اما المنحنى AD فهو يوضح اعتماد درجة انصهار الجليد على الضغط وهو يمثل حالة التوازن بين السائل والصلب. يلاحظ كذلك ان الخط AD يقترب باتجاه احداثي الضغط P عند ازدياده خلافاً لما تسلكه معظم المواد، ويرجع السبب الى ان الماء السائل يشغل حجماً صغيراً بالمقارنة مع حجم الماء المنجمد ولذلك حسب قاعدة لي شاتيليه نتوقع ان زيادة الضغط ستصهر الجليد ويميل التوازن الى الحالة السائلة ويؤدي هذا الى انخفاض درجة حرارة الانجماد. كما يمكن ملاحظته من الشكل (1-8).

ان تطبيق قاعدة الطور على الماء يمكن توضيحه بالاعتماد على المخطط المذكور، حيث توجد المناطق الثلاث، الجليد والماء السائل، والبخار المنفصلة عن بعضها فيزيائياً، فكل طور يتكون من مكونة واحدة هي الماء. ويلزم متغيرين اخرين لاعطاء وصف كامل للمنظومة وهما الضغط ودرجة الحرارة وبهذا تصبح قاعدة الطور:

$$F = C - P + 2 = 1 - 1 + 2 = 2$$

وعلى هذا الاساس يكون عدد المتغيرات (2).

اما حالات التوازن التي تنشأ بين طورين مثل الماء السائل وبخاره او الماء السائل والجليد، او الجليد والبخار فان وضعها يعتمد على تحديد احد المتغيرين، الضغط او درجة الحرارة. ويبين الخط الفاصل بين اي طورين انه اذا ثبتت احدهما فان المتغير الاخر يكون المنظومة في مكان ما على خط طور التوازن. وبذلك تعطى قاعدة الطور:

$$F = 1 - 2 + 2 = 1$$

وصفاً لهذا السلوك . ويبين الشكل (1-8) المنحنيات AB و AD أو AC التي تمثل حالات التوازن بين كل طورين اثنين . وعندما تكون هناك ثلاثة اطوار في حالة توازن فليس من الضروري معرفة درجة الحرارة أو الضغط لانه توجد هناك درجة حرارة واحدة وضغط واحد يسمح لتواجد الحالات أو الاطوار الثلاثة في توازن وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة عند ضغط ثابت فان الماء السائل والجليد سوف ينقلا الى الحالة البخارية وسوف تكون هناك الحالة الغازية فقط . وإذا انخفضت درجة الحرارة نحصل على حالة الماء والجليد فقط . كذلك عند زيادة الضغط عند درجة حرارة ثابتة فان البخار سوف يتكثف الى الحالة السائلة وإذا انخفض الضغط فان السائل والجليد سوف يتحولان الى الحالة البخارية .

ان عدد المتغيرات F يكون مساوياً الى الصفر لانه توجد ثلاثة اطوار ومكونة واحدة ، واستناداً الى قانون الطور :

$$F = C - P + 2 = 1 - 3 + 2 = 0$$

وان النقطة هذه تسمى النقطة الثلاثية .

# الفصل التاسع

## التوازن الكيميائي Chemical Equilibria

### 1-9 المقدمة

ان الوجود الانساني يعتمد الى حد كبير على التغيرات الكيميائية والفيزيائية، سواء كانت هذه التغيرات خارجية وتؤثر علينا بشكل مباشر او غير مباشر، او سواء حدثت هذه التغيرات داخل اجسامنا وضمن خلايانا الحية.

في الفصول السابقة طبقنا الدينامية الحرارية على العمليات الفيزيائية وسنحاول في هذا الفصل تطبيق الدينامية الحرارية على التفاعلات الكيميائية. ان هدف الديناميك الحراري منحنا اطاراً نظرياً يمكن بواسطته ان نفسر التغيرات الكيميائية واتجاهاتها ونقطة التوازن التي يمكن ان يصلها التفاعل في ظروف معينة. ان الكثير من هذه التفاعلات والتوازنات تحدث في الغازات والمحاليل المثالية وغير المثالية وفي التراكيب البلورية، وتؤثر على هذه الحالات قوى تجاذب متعددة يمكن ان تكون ذات تأثيرات مختلفة على التوازن.

### 2-9 الدينامية الحرارية للغازات المثالية

#### Thermodynamic of ideal gases

تناولنا في الفصل الرابع مدخلاً الى الجهد الكيميائي وسنطور في هذا الفصل استخدام هذه الدالة في التوازنات الكيميائية. ويمكن التعبير عن الجهد الكيميائي لمادة نقية بالطاقة الحرة لكبس المولارية  $G$ . ومن الممكن كتابة المعادلتين التاليتين:

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_P = - \bar{S} \quad \dots\dots\dots (9-1)$$

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial P}\right)_T = \bar{V} \quad \dots\dots\dots(9-2)$$

وباستعمال المعادلة العامة للغازات المثالية :

$$PV = nRT \quad \dots\dots\dots(9-3)$$

$$P \bar{V} = RT$$

$$\bar{V} = \frac{RT}{P}$$

وبتعويض المعادلة (9-3) في (9-2) ينتج :

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial P}\right)_T = \frac{RT}{P} \quad \dots\dots\dots(9-4)$$

عند تكامل المعادلة من الضغط القياسي الى اي ضغط بالشكل :

$$\int_{\mu_0}^{\mu} d\mu = RT \int_{P_0}^P \frac{dP}{P} \quad \dots\dots\dots(9-5)$$

تصبح بالشكل

$$\mu - \mu_0 = RT \ln \frac{P}{P^0}$$

او

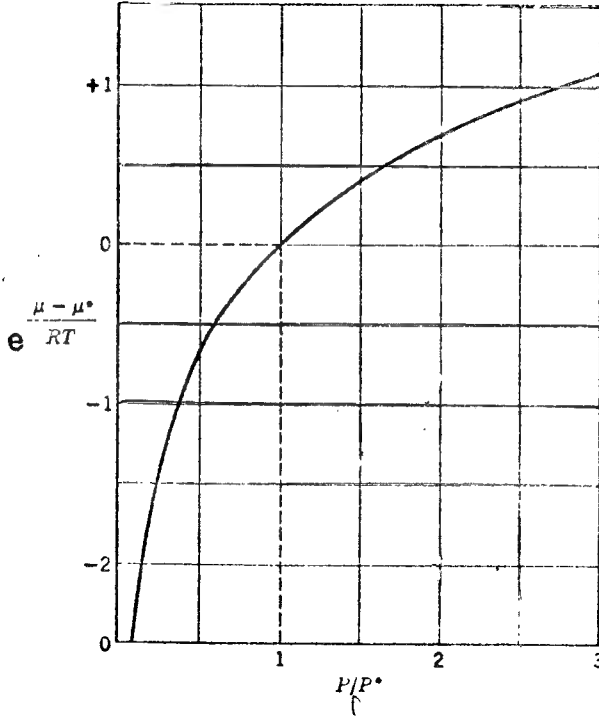
$$\mu - \mu^0 + RT \ln \frac{P}{P^0} \quad \dots\dots\dots(9-6)$$

ويمكن اعادة تنظيم المعادلة (9-6) بالشكل :

$$\frac{\mu - \mu^0}{RT} = \ln \frac{P}{P^0} \quad \dots\dots\dots(9-7)$$

ويوضح الشكل (9-1) العلاقة ما بين الجهد الكيميائي لغاز مثالي

والضغط عندما يكون الضغط القياسي مساو لجو واحد



الشكل (1-9) : اعتماد الجهد الكيميائي لغاز مثالي على ضغط الغاز .

### 3-9 الانتروبي والتوازن Entropy and Equilibrium

قبل الدخول الى موضوع التوازنات لابد لنا من تحديد اهمية بعض دوال الدينامية الحرارية واولهما التغير في الانتروبي  $\Delta S$  اذ انها تمنحنا رؤية موحدة تغطي وتفسر التغيرات الفيزيائية والكيميائية، وقد اوضحنا سابقاً بان الانتروبي للمنظومة المعزولة يكون :

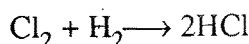
$$\Delta S \geq 0 \quad \text{.....(9-8)}$$

وتعني بالمنظومة المعزولة، ذلك الجزء الذي تكون فيه الطاقة الداخلية والحجم ثابتين، لذلك فان الانتروبي في هذه الحالة اما ان يبقى ثابتاً او يزداد، وعندما يبقى ثابتاً فان المنظومة في حالة توازن. اما اذا تغيرت حالة المنظومة فان الانتروبي التابع لها سيزداد. ان الامر المهم ملاحظته ان القانون الثاني يبين ان هنالك زيادة في انتروبية المنظومات وتكون محدودة فقط بالنسبة للمنظومات المعزولة. اذ ان جسم الانسان والحيوان عبارة عن منظومات شديدة التعقيد وعالية الانتظام، وتعتبر منظومات مفتوحة لذلك

قانون الأول يطبق عليها، بل يمكن ان يطبقه على هذه المنظومات كجزء من المحيط لذلك فان اجسامنا عندما تتجه نحو التعقيد فانها تأخذ من حولها المواد عالية التنظيم وتفرز للمحيط المواد الاقل انتظامية .

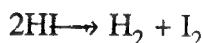
## 4-9 حالة التوازن الكيماوي Chemical Equilibrium

ان من الضروري النظر الى حالة التوازن من ناحية دينامية، فعندما نتكلم عن توازن ما بين طور البخار وطور السائل فان هذه الحالة تبدو على صعيد الحالة العيانية (Macroscop) حالة ثابتة، في حين انها على صعيد الحالة المجهرية (Microscop) حالة دينامية، اذ ان جزيئات السائل والبخار في حركة مستمرة لذلك فان بعض جزيئات البخار ستتكثف، في حين ستبخر من داخل السائل لتتحول الى بخار ولو اخذنا التفاعل التالي :



لوجدنا عند وصوله الى حالة التوازن فان الحالة تبدو وكأنها ثابتة، غير ان الحقيقة هي غير ذلك، اذ ان بعض جزيئات الهيدروجين والكلور ستتحولان لتكونان بخار كلوريد الهيدروجين الناتج بدوره سيتفكك الى جزيئات الكلور والهيدروجين .

لقد تنبه الى هذا الواقع العالمان النرويجيان كولدبيرج، وخاجة Guldborg and Waage وقاما بوضع قانون رياضي يعبر عن هذه الحالة في عام 1863 عندما درسا التفاعل التالي :



ووضع القانون التالي :

$$V_f = k_f [\text{H}] [\text{I}_2]$$

حيث حيث  $(\text{H}_2)$  و  $[\text{I}_2]$  تمثلان الكتلتان (active masses) لنتائج التفاعل الهيدروجيني واليود على التوالي . وان  $k_f$  ثابت سرعة التفاعل . وقد اطلق على هذا التفاعل بالتفاعل الطردى كما تدل عليه اللواحق السفلى لكل من سرعة التفاعل  $V_f$

وثابت سرعة التفاعل  $K_f$ . كما وجد هذان العالمان ان سرعة التفاعل في الاتجاه المعاكس  $V_r$  يتناسب طردياً مع مربع الكتلة الفعالة لمادة التفاعل  $HI$  اي ان :

$$V_r = k_r [HI]^2$$

حيث  $K_f$  ثابت سرعة التفاعل العكسي او الرجوعي . ونعندما تصل الكتل الفعالة للمواد الناتجة والمتفاعلة الى قيم ثابتة والتي تمثل حالة التوازن تتساوى سرعتا التفاعلين الطردي والعكسي او الرجوعي ومنها تمكنا من الحصول على صيغة التوازن التالية :

$$K_{eq} = \frac{k_f}{k_r} = \frac{[HI]^2}{[H_2]_{eq}[I_2]_{eq}} \quad \dots\dots(9-9)$$

حيث اللاحقة السفلى تدل على حالة التوازن .

## 5-9 تفسير طاقة كبس الحرة

### Interpretation of Gibbs Free Energy

لو رجعنا الى المعادلة التالية :

$$dG = - SdT + VdP \quad \dots\dots\dots(9-10)$$

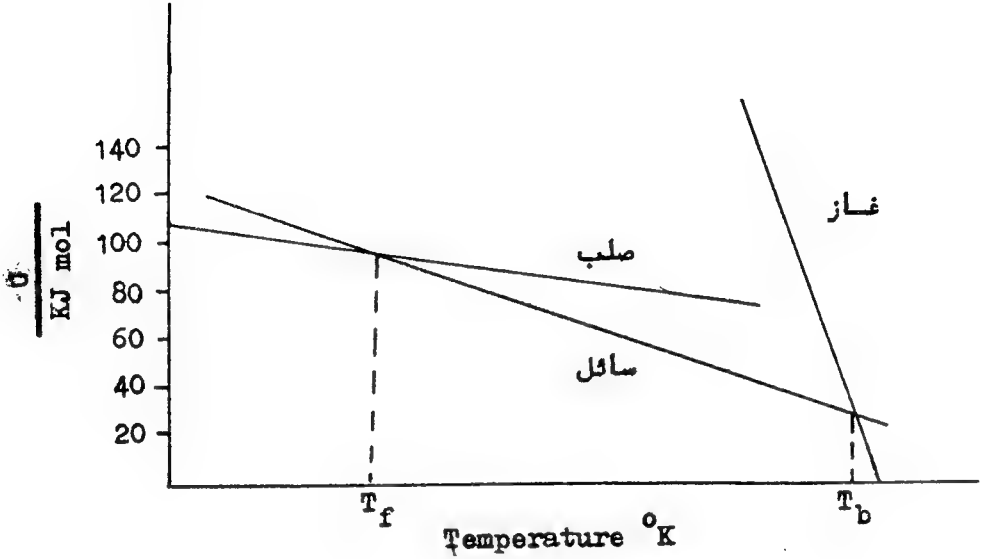
لوجدنا ان هذه المعادلة هي الاساس لاستخدام طاقة كبس الحرة كمعيار لتوازن المنظومة في درجة حرارة وضغط ثابتين . ولو اخذنا الظروف التي يكون فيها الضغط ثابتا اي ان  $dp=0$  ودرجة الحرارة ثابتة اي ان  $dT=0$  وتعويض قيمتي هذين التفاعلين في المعادلة (9-10) ينتج ان :

$$dG = 0 \quad \dots\dots\dots(9-11)$$

اي ان اي تغيير في المنظومة عند التوازن وفي درجة حرارة وضغط ثابتين يعطينا تغيراً لطاقة كبس الحرة مساوياً للصفر . وسنتناول الان تطبيق دالة كبس الحرة لتغير الاطوار لمادة الرصاص والشكل (9-2) يوضح العلاقة ما بين طاقة كبس الحرة



لحالتها الصلبة والسائلة وفي درجات حرارة معينة :



الشكل (2-9) : انخفاض طاقة كبس الحرة مع ازدياد درجة الحرارة للخصائص الصلبة والسائل والبخار .

لاية منظومة عند التوازن في درجة حرارة وضغط ثابتين فان اي تغير في المنظومة يجب ان يستوفي الشرط  $dG=0$  وهذا يعني بان طاقة كبس الحرة لمنظومة معينة عند درجة حرارة وضغط ثابتين لكي تصل الى حالة التوازن . اما ان تقترب قيمتها من النهاية الدنيا (Minimum) او النهاية العظمى (Maximum) ، وحسب العلاقة  $\Delta G \leq 0$  فان من الواضح بان اوطأ قيمة كبس الحرة هي التي تستوفي شروط التوازن ، لأن  $G$  تقل في تغير تلقائي لمنظومة عند درجة حرارة وضغط ثابتين . يلاحظ من الشكل (2-9) ان الحالة السائلة او المنصهرة للخصائص تقع بين الحالتين الصلبة والبخارية ، حيث تكون اكثر ثباتاً واستقراراً من الحالة الصلبة فعند خفض

درجة الحرارة دون درجة الانصهار  $T_{fuss}$  تكون قيمة طاقة كبس الحرة اوطاً من نظيرتها الحالة السائلة او المنصهرة . اي تكون الحالة الصلبة في هذه المنطقة اكثر ثباتاً واستقراراً اما المنصهر الذي تعتبر درجة حرارته درجة الغليان عند التسخين فواضح ان طاقة كبس الحرة التابعة له في هذه المنطقة تكون اعلى من الحالة البخارية اي ان الحالة البخارية للرصاص تكون اكثر استقراراً من الحالة المنصهرة فوق درجة الغليان . من هذه المنحنيات يمكن تخمين قيمة الانثروبي لكل حالة وتكون كالآتي :

$$Sm_{(g)} > Sm_{(l)} > Sm_{(s)}$$

حيث ان

$$\left[ \frac{\partial G}{\partial T} \right]_P = - Sm$$

وهذه المعادلة هي نفس المعادلة (9-1) التي تعبر عن تغير الجهد الكيميائي بالنسبة الى التغير في درجة الحرارة . ووفقاً لشروط التوازن تكون قيمة طاقة كبس الحرة للحالة الصلبة عند درجة الانصهار مساوية لنظيرتها في الحالة المنصهرة عند نفس درجة الانصهار ايضاً اي ان :

$$G_i (\text{solid}) = G_i (\text{liquid})$$

كذلك تكون :

$$G'_i (\text{liquid}) = G'_{(g)}$$

عند درجة الغليان .

مثال :

احسب التغير في طاقة كبس الحرة لتحول مول واحد من الماء في درجة الغليان تحت ضغط واحد جو الى بخار في نفس درجة الغليان البالغة 100 م° .

الحل :

يمكن استعمال المعادلة التالية :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

حيث تتم عملية التبخر في درجة حرارة ثابتة التي هي 100 م° . وبما ان العمليتين اجريت تحت ظروف الضغط الثابت فان التغير في الانثالبي يجب ان يعادل الحرارة

التي امتصت من قبل الماء اثناء هذه العملية فان :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{vap}}$$

اما تغير الانثروبي فيكون كما يلي :

$$\Delta S = - \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T}$$

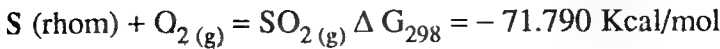
اي ان

$$T \Delta S = - \Delta H_{\text{vap}}$$

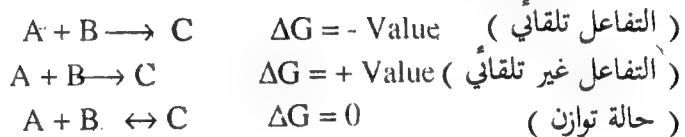
وبتعويض المعادلتين (c), (b) في المعادلة (a) ينتج :

$$\Delta G = \Delta H_{\text{vap}} - \Delta H_{\text{vap}} = 0$$

تبين هذه المعادلة ان طاقة كبس الحرة تحول مول واحد من الماء عند درجة غليانه الى مول واحد من البخار تساوي صفراً. ان من المهم الانتباه الى اشارة G فعلى سبيل المثال :



ان اشارة  $\Delta G$  تدل على ان هذا التفاعل ينحو باتجاه التلقائية اي ان القوة هي باتجاه دفع التفاعل من اليسار الى اليمين وبالتالي فان هذا التفاعل يولد طاقة مساوية لـ  $G$  تفرق عن الصفر. اما اذا كان اتجاه التفاعل من اليمين الى اليسار فان اشارة  $G$  تصبح موجبة ويكون التفاعل غير تلقائي ومن الضروري ان يمتص التفاعل شغلاً مساوياً لقيمة  $G$  من اجل ان يستمر في الاتجاه الذي ترغب فيه كان يكون من اليمين الى اليسار لذلك من الممكن ان نكتب معايير التوازن Criteria of equilibrium كالآتي :



## 6-9 اعتماد الطاقة الحرة على الضغط ودرجة الحرارة :

### Dependence of Gibbs Free Energy on Pressure and Temperature

كما بينا سابقاً إن  $\Delta G$  دالة حالة وعليه من الممكن كتابة العلاقة التالية :

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P dT \quad (9-12)$$

المشتقة من المعادلة

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad \dots\dots\dots(9-13)$$

وإذا كان الشغل الوحيد هو شغل ضغط حجم وان كلا من الانثروبي والحجم ثابتين في منظومة معزولة، حيث  $dU = 0$  صفراً

يمكن ان تتحول المعادلة (9-13) الى

$$dG = V dP - SdT \quad \dots\dots\dots(9-14)$$

وبمقارنة المعادلة (9-14) مع معادلة (9-12) لنحصل على المعادلة التي احنا اليها في مناقشة تحول الرصاص بين الحالتين الصلبة والسائلة :

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S \quad \dots\dots\dots(9-15)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V \quad \dots\dots\dots(9-16)$$

## 7-9 حساب $\Delta G$ Gibbs Free Energy Calculation

من معادلة (9-16) لنحصل على

$$\int_{G_1}^{G_2} dG = \int_{P_1}^{P_2} V dP \quad \dots\dots\dots(9-17)$$

فمن القانون العام للغازات المثالية :

$$V = \frac{nRT}{P}$$

وبتعويض قيمة V في المعادلة (9-17) ينتج مايلي :

$$\int_{G_1}^{G_2} dG = nRT \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} \quad nRT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

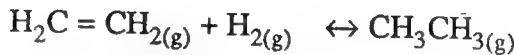
$$\Delta G = nRT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \dots\dots\dots(9-18)$$

هذه المعادلة صالحة لحساب  $\Delta G$  للغازات . اما بالنسبة للمواد في حالتها السائلة والصلبة فان التغير في الحجم يكون صغيراً جداً وتصبح المعادلة (9-13) بالشكل الاتي :

$$\Delta G = V (P_2 - P_1) \quad \dots\dots\dots(9-19)$$

هذا ويمكن الحصول على قيم طاقة كبس الحرة القياسي للتكوين للمواد الكيميائية من جداول خاصة كما مدرج في ( جدول 9-1) .

من الممكن استخدام هذه القيم للوصول الى قيم  $\Delta G^\circ$  لمواد مجهولة ، فعلى سبيل المثال من الممكن حساب طاقة كبس الحرة للتفاعل التالي باستخدام طاقة التكوين للمواد المتفاعلة والمنتونة :



جدول (1-9) : قيم الدينامية الحرارية للمواد في حالتها القياسية في 298.15 K .

Substance	$\Delta H_f^0$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$S^0$ (JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\Delta G_f^0$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$C_p^0$ (JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
Ag(c)	0.0	42.7	0.0	25.5
AgBr(c)	-100.4	107.1	-96.9	52.4
AgCl(c)	-127.1	96.2	-109.8	50.8
AgNO <sub>3</sub> (c)	-124.5	141	-33.6	93.1
Al(c)	0.0	18.3	0.0	24.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (c)	-1676	50.9	-1583	79.0
B(c)	0.0	5.86	0.0	12.0
B(g)	570	143	530	20.8
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	31.4	233	82.3	56.4
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (c)	-1273	54.0	-1194	62.3
BN(c)	-251	14.8	-225	12.4
Ba(c)	0.0	62.8	0.0	-
BaCl <sub>2</sub> (c)	-859	124	-811	83.5
BaO	-554	70.4	-526	45.3
Be(c)	0.0	9.54	0.0	17.8
Be(g)	320	136	290	20.8
BeO(c)	-610	14.1	-580	25.4
Br <sub>2</sub> (l)	0.0	152	0.0	-
Br <sub>2</sub> (g)	30.90	245.3	3.08	36.0
C(graphite)	0.0	5.73	0.0	8.64
C(g)	716.7	157.99	671.3	20.8
CO(g)	-110.41	197.91	-137.15	29.1
CO <sub>2</sub> (g)	-393.51	213.64	-394.38	37.1
CS <sub>2</sub> (l)	89.58	152	65.0	77.0
Ca(c)	0.0	41.4	0.0	26.3
CaF <sub>2</sub> (c)	-1220	68.9	-1168	67.0
CaCl <sub>2</sub> (c)	-796	104.6	-748	72.8
CaO(c)	-635	39.7	-604	43.1
Ca(OH) <sub>2</sub> (c)	-986	83.4	-898	87.5
CaC <sub>2</sub> (c)	-59.0	70.7	-64.3	62.4
CaCO <sub>3</sub> (c)	-1205	91.7	-1127	81.9
Cl <sub>2</sub> (g)	0.0	223	0.0	33.9
Co(c)	0.0	30.0	0.0	24.6
CoO(c)	-239	53.0	-215	52.7
Cr(c)	0.0	23.6	0.0	23.2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (c)	-1140	81.2	-1060	104.5
Cu(c)	0.0	33.1	0.0	24.5
Cu <sub>2</sub> O(c)	-171	92.4	-141	69.9
CuO(c)	-156	42.6	-128	44.4
CuS(s)	-52.3	66.8	-52.8	47.7
CuSO <sub>4</sub> (c)	-770	113	-672	101
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O(c)	-2280	305	-1880	281
F <sub>2</sub> (g)	0.0	203	0.0	31.5
Fe(c)	0.0	27.3	0.0	25.2
Fe <sub>0.947</sub> O(c)	-266	57.5	-244	35.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (c)	-824	87.4	-742	105

\* Data are mainly from G.N. Lewis and M.Randall ,Thermodynamics ,2nd ed. revised by K.S. Pitzer and L.Brewer (New York : McGraw Hill Book Company, 1961),with amended tables through courtesy of Professors Pitzer and Brewer; and O.Kubaschewski and C. B. Alcock, Metallurgical Thermochemistry ,5th ed. (Oxford: Pergamon Press, 1979).

Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$S^\circ$ (JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\Delta G_p^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$C_p^\circ$ (JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (c)	-1119	146	-1016	152
FeS(c)	-100	60.3	-105	54.6
Ge(c)	0.0	31.1	0.0	23.3
GeH <sub>4</sub> (g)	90.8	217	113	-
H <sub>2</sub> (g)	0.0	130.0	0.0	28.8
H(g)	217.97	114.6	203.27	20.8
HBr(g)	-36.23	198.6	-53.3	29.1
HF(g)	-271.1	173.7	-273.2	28.5
HI(g)	26.5	206.4	1.87	29.2
HCN(g)	134.7	202	124.2	35.9
HNO <sub>3</sub> (l)	-173.2	156	-80.0	110
H <sub>2</sub> O(l)	-285.84	69.44	-237.04	75.3
H <sub>2</sub> O(h)	-241.83	188.72	-228.59	33.6
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	-187.6	109.5	-120.2	-
H <sub>2</sub> S(g)	-20.6	206	-33.6	34.0
Hg(l)	0.0	75.9	0.0	27.8
Hg(g)	60.8	174.8	31.9	20.8
HgCl(c)	-132.6	96.2	-105.4	50.9
I <sub>2</sub> (c)	0.0	117	0.0	55.0
I <sub>2</sub> (g)	62.42	261	19.5	36.9
K(c)	0.0	64.6	0.0	29.2
K(g)	89.2	160	60.8	20.8
KCl(c)	-436.7	82.5	-409	51.5
KI(c)	-328	106.4	-323	52.0
Li(c)	0.0	29.3	0.0	23.6
Li(g)	159	139	126	20.8
LiF(c)	-615	35.6	-586	44.7

LiCl(c)	-408	59.3	-384	<b>50.2</b>
LiH(c)	-90.0	20.1	-67.8	-
Mg(c)	0.0	32.7	0.0	<b>23.9</b>
MgCl <sub>2</sub> (c)	-641.4	89.5	-592	<b>71.3</b>
MgSO <sub>4</sub> (c)	-1285	91.6	-1171	<b>98</b>
Mn(c)	0.0	32.0	0.0	<b>26.3</b>
MnO <sub>2</sub> (c)	-520	53.1	-465	<b>54.0</b>
N <sub>2</sub> (g)	0.0	191.5	0.0 <sup>i</sup>	<b>29.1</b>
N(g)	472.7	153.2	455.6	<b>20.8</b>
NH <sub>3</sub> (g)	-45.9	192.5	-16.3	<b>35.7</b>
NH <sub>4</sub> Cl(c)	-315	94.6	-203	<b>84.1</b>
N <sub>2</sub> O(g)	82.05	220	104	<b>38.6</b>
NO(g)	90.8	211	87.0	<b>29.9</b>
NO <sub>2</sub> (g)	33	240.5	51.1	<b>37.9</b>
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g)	11.3	346	118.0	
Na(c)	0.0	51.2	0.0	<b>28.4</b>
Na(g)	106.7	153.6	76.2	<b>20.8</b>
Na <sub>2</sub> (g)	142	230	104	-
NaCl(c)	-411	72.1	-384	<b>49.7</b>
NaBr(c)	-361	86.8	-349	<b>52.3</b>
NaOH(c)	-427	64.4	-381	<b>80.3</b>
NaNO <sub>3</sub> (c)	-467	116	-366	<b>93.1</b>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (c)	-1130	136	-1050	<b>110.5</b>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1380	149.5	-1262	<b>128</b>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O(c)	-4320	593	-3640	<b>587</b>
Ni(c)	0.0	29.9	0.0	<b>25.8</b>
NiO(c)	-241	38.1	-213	<b>44.1</b>
NiS(c)	-94.1	52.9	-91.4	<b>46.9</b>
O <sub>2</sub> (g)	0.0	205	0.0	<b>29.4</b>
O(g)	249.2	161.0	231.8	<b>20.8</b>
P(c,white)	17.4	41.1	11.9	<b>23.2</b>
P(c,red)	0.0	22.8	0.0	-
P(g)	334	163	292	<b>20.8</b>
PCl <sub>3</sub> (g)	-271	312	-257	<b>88.2</b>
PCl <sub>5</sub> (g)	-350	364	-285	<b>148</b>

---



Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$S^\circ$ (JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\Delta G_p^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$C_p^\circ$
PH <sub>3</sub> (g)	+22.8	210	+25.4	46.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (c)	-1475	114	-1343	123.4
Pb(c)	0.0	65.1	0.0	26.8
PbO(red)	-219.0	66.5	-189.0	54.2
PbO(yellow)	-217.3	68.8	-187.8	46.2
PbS(c)	-100.4	91.2	-98.7	49.5
Pu(c)	0.0	55.2	0.0	—
PuO <sub>2</sub> (c)	-1060	68.4	-1003	69.8
S(orthorh)	0.0	31.9	0.0	22.6
S(g)	279	167.7	237	20.8
SF <sub>6</sub> (g)	-1220	293	-1116	—
SO <sub>2</sub> (g)	-296.8	249	-300	31.8
SO <sub>3</sub> (g)	-395.7	256	-370	50.6
Si(c)	0.0	18.8	0.0	19.9
si(g)	456	168	412	20.8
SiC(c)	-73.2	16.6	70.8	26.3
SiCl <sub>4</sub> (g)	-663	331	-623	112
SiO <sub>2</sub> (α quartz)	-911	41.5	-857	44.4
Sn(white)	0.0	51.4	0.0	26.3
Sn(gray)	1.97	44.1	4.15	—
SnCl <sub>4</sub> (g)	-529	259	-458	98.4
SnO(c)	-286	56.5	-257	44.4
Ti(c)	0.0	30.6	0.0	25.0
TiO <sub>2</sub> (rutile)	-940	50.3	-890	55.0
U(c)	0.0	50.3	0.0	27.8
UF <sub>4</sub> (c)	-1900	151.7	-1810	116
UF <sub>6</sub> (g)	-2140	378	-2060	129
UO <sub>2</sub> (c)	-1080	77.8	-1040	63.7
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (c)	-3570	282	-3265	237
Zn(c)	0.0	41.6	0.0	25.1
ZnO(c)	-348	43.6	-318	40.3
ZnS(hex)	-206	57.7	-201	55.7

من الملحق فان طاقة التكوين لـ  $\text{CH}_3\text{CH}_3$  هي  $-32.89 \text{ KJ mol}^{-1}$   
 وطاقة التكوين لـ  $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$  هي  $68.12 \text{ KJ mol}^{-1}$  لذلك فان :  
 $\Delta G_{298} = -32.89 - (68.12) = -101.01 \text{ KJ mol}$

ان هذا التفاعل يحدث بصورة تلقائية غير انه يحتاج الى عامل مساعد لتنشيط هذا التفاعل .

## 8.9 الدينامية الحرارية لخليط غازات مثالية :

### Thermodynamic of ideal mixtures

سنتناول الان الدينامية الحرارية للغازات المثالية ونحاول ان نحصل على تعبير الطاقة الحرة لكبس خليط غازات مثالية . للغازات المثالية فان الجهد الكيميائي لهذا الخليط يتبع المعادلة التالية :

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i p = \mu_i^0 + RT \ln P_i \quad \dots\dots\dots(9-29)$$

حيث ان  $\mu_i$  هي الجهد الكيميائي القياسي للمكونة  $i$  و  $p$  هو الضغط الكلي للخليط و  $x_i$  هو الكسر المولي للمكونة  $i$  . باستخدام القانون العام للغازات ولمول واحد نحصل على :

$$\bar{V}_i = \frac{RT}{P}$$

وبتعويض هذه العلاقة في العلاقة

$$\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial P}\right)_{T, n_i, n_j} = \bar{V}_i = \frac{RT}{P} \quad \dots\dots\dots(9-30)$$

ولابحاج الحجم الكلي للخليط فان :

$$V = \sum n_i \bar{V}_i = \frac{RT}{P} \sum n_i \quad \dots\dots\dots(9-31)$$

حيث  $n_i$  يمثل عدد المولات المكونة  $i$  يمكن ايضا ايجاد العلاقة بين الطاقة الحرة لكبس والجهد الكيميائي والتي تمثل بـ :

$$G = \sum n_i \mu_i \quad \dots\dots\dots(9-32)$$

ان الطاقة الحرة لكبس لغازين متباين هي :

$$G_{\text{initial}} = n_1 \mu_1^0 + n_2 \mu_2^0 \quad \dots\dots\dots(9-33)$$

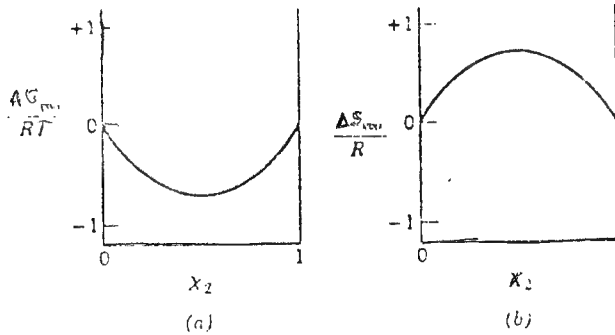
وبادخال المعادلة 29.9 في 33-9 ينتج :

$$G_{\text{initial}} = n_1 \mu_1^0 + n_2 \mu_2^0 + RT (n_1 \ln x_1 + n_2 \ln x_2) \quad \dots\dots\dots(9-34)$$

ان طاقة المزج تساوي

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{mix}} &= \Delta G_{\text{final}} - \Delta G_{\text{initial}} \\ &= RT (n_1 \ln x_1 + n_2 \ln x_2) \\ &= nRT (x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) \quad \dots\dots\dots(9-35) \end{aligned}$$

ان الكسر المولي لكل مكونة اقل من واحد . لذلك فان الحدود في المعادلة (35-9) ستكون سالبة وهذا يعني بان  $\Delta G_{\text{mix}} < 0$  اي ان عملية مزج الغازات المثالية عملية تلقائية في ظروف درجة الحرارة الثابتة والضغط الثابت ان الرسم (3-9) يوضح علاقة  $\Delta G$  لمزج غازين مثاليين مع التغير في الكسر المولي ونلاحظ في ان قيمة  $\Delta G_{\text{mix}}$  تأخذ قيمة سالبة عندما تكون الكسور المولية لغازين مثاليين متساويين تقريباً :



شكل (3-9): الكميات الدينامية الحرارية لمزج غازين مثاليين لتكوين مول واحد من مزيج

من المعادلة التالية :

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S \quad \text{.....(9-36)}$$

يمكن كتابة معادلة مزج غازين مثاليين :

$$\left(\frac{\partial \Delta G_{\text{mix}}}{\partial T}\right)_P = -\Delta S_{\text{mix}} \quad \text{.....(9-37)}$$

$$\Delta S_{\text{mix}} = -nR (x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) \quad \text{.....(9-38)}$$

يوضح الشكل (9-3) العلاقة بين الكسر المولي للمكونة  $x_2$  وانتروبي المزج، حيث ان الانتروبي يبلغ اعلى حد موجباً له عندما تكون الكسور المولية للمكونة 1 مساوية للمكونة 2، فمن المعادلة السابقة يمكن كتابة معادلة توضح العلاقة بين طاقة كبس الحرة للمزج مع انتروبي او انثالبي المزج وهي :

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T \Delta S_{\text{mix}}$$

وبما ان مزج غازين مثاليين لاينتج عنهما اي حرارة .

$$\Delta H_{\text{mix}} = 0 \quad \text{لذلك فان}$$

ويمكن تحديد العلاقة بين الطاقة الحرة للمزج والتغير في الحجم للمزج وذلك باستعمال المعادلة (9-25) للحصول على

$$\left(\frac{\partial \Delta G_{\text{mix}}}{\partial P}\right)_T = \Delta V_{\text{mix}} \quad \text{.....(9-39)}$$

وبما ان للغازات المثالية فان انعدام قوة التجاذب او التنافر بين جزيئات الغاز لا تحدث تغيراً في الحرارة ولا في الحجم لذلك

$$\Delta V_{\text{mix}} = 0 \quad \text{.....(9-40)}$$

## 9-9 الفعالية والفيوكاستي : Fugacity and activity

تحدثنا فيما سبق عن الغازات المثالية التي تتميز بعدم وجود قوى تجاذب ما بين جزيئات الغاز المثالي ولقد بينا في الفصول السابقة بان الغاز الحقيقي لا يتبع المعادلة العامة للغازات وبأن الحجم لا يساوي  $V$  انما يعطي بقيمة توضحها معادلة فان ديرفال .

لقد كان العالم ج. ن — لويس Lewis اول من وضع علاقة ما بين الفعالية الفيوكاستي للغازات الحقيقية . لناخذ الان كمية من الكحول في دورق . ان جزيئات من الكحول ستحاول الهروب الى الحالة البخارية وتتحول الى بخار وبذلك يتولد ضغطاً بخارياً . وفي نفس الوقت فان جزيئات من البخار ستحاول الهروب من الطور البخاري وتتكثف وتستمر هذه العملية الديناميكية حتى الوصول الى درجة التوازن ، اي ان جزيئات الكحول التي تهرب من الطور السائل ستساوي عدد الجزيئات التي ستهرب من الطور البخاري وبذلك فان الضغط البخاري يصبح ثابتاً عند هذه النقطة ، لقد بين لويس بان قابلية المادة للهروب من طور ما تسمى الفيوكاستي Fugacity ويمكن تمثيلها بالرمز  $f$  والعلاقة التالية تربط ما بين الفيوكاستي وطاقة جيبس الحرة :

$$G = RT \ln f + B$$

حيث  $B$  ثابت يعتمد على درجة الحرارة وطبيعة المادة تحت الدراسة . اما الفيوكاستي في الظروف القياسية فيعطي الرمز  $f^\circ$  ويمكن التخلص من قيمة الثابت  $B$  . بعبارة الفيوكاستي في الظروف القياسية وفي ظروف اخرى غير قياسية ، لذلك يمكن كتابة المعادلة (9-41) :

$$G - G^\circ = RT \ln \frac{f}{f^\circ} \quad \dots\dots\dots(9-42)$$

او

$$G = G^\circ + RT \ln \frac{f}{f^\circ} \quad \dots\dots\dots(9-43)$$

يمكن الان ان نعرف الفعالية بالنسبة التالية :

$$\frac{f}{f^0} = a \quad \text{.....(9-44)}$$

بتعويض المعادلة (9-44) في معادلة (9-43) ينتج:

$$G = G^0 + RT \ln a \quad \text{.....(9-45)}$$

تدعى الكمية  $a$  بالفعالية، في الحالة القياسية فان قيمة  $a = 1$  اما في حالة اخرى غير قياسية فان قيمة الفعالية ستختلف عن 1. وحينما تكون هنالك حالتين بعيدتين عن الحالة القياسية فان المعادلة (9-45) تكتب لعدد  $n$  مول من المادة:

$$\Delta G = G_2 - G_1 = (G^0 + nRT \ln a_2) - (G^0 + nRT \ln a_1)$$

$$\Delta G = nRT \ln \frac{a_2}{a_1} \quad \text{.....(9-46)}$$

قبل محاولة ايجاد قيم للفعالية فان من الضروري التطرق الى الحالات الحقيقية.

## 10-9 الحالة القياس للغازات الحقيقية:

### Standard State for Real Gases

الفعالية ومعامل الفعالية للغازات المثالية. فان الفيوكاسيتي يساوي الضغط — ويمكن ان نحول الغازات الى غازات مثالية بخفض الضغط حتى يقارب الصفر، لذلك فان من الممكن تعريف الضغط الفعال بالمعادلات التالية:

$$p \longrightarrow 0 \quad f = P \quad \text{.....(9-47)}$$

$$\lim_{P \longrightarrow 0} \frac{f}{P} = 1 \quad \text{.....(9-48)}$$

$$P \longrightarrow 0$$

طالما ان الغاز مثالي فان النسبة  $f/P$  تساوي 1

ولكن عند انحراف الغاز عن السلوك المثالي فان  $f$  لايساوي  $P$  وتصبح النسبة  $f/P$  بمعامل الفيوكاسيتي للغاز Fugacity coefficient ( لا ) وهي عبارة عن مقياس مدى انحراف اي غاز عن السلوك المثالي عند ضغط درجة حرارة معينة.

## 11-9 اشتقاق ثابت التوازن للغازات المثالية :

### Derivation of Equilibrium constant of ideal gases

يمكن تمثيل تفاعل ما بالمعادلة التالية :



حيث  $a$  و  $b$  و  $c$  و  $d$  عدد مولات المواد المتفاعلة والناجمة ويمكن الآن الاعتماد على ضغوط المواد المتفاعلة  $P_A$  و  $P_B$  والناجمة  $P_C$  و  $P_D$  لكتابة صيغة التوازن :

$$K_{eq} = \left[ \frac{(P_C)^c (P_D)^d}{(P_A)^a (P_B)^b} \right] \quad \text{.....(9-50)}$$

والآن لنحاول إيجاد علاقة بين ثابت التوازن وبين طاقة كبس الحرة من المعادلة السابقة :

$$\left( \frac{\partial G}{\partial P} \right)_T = V$$

$$G_2 - G_1 = \int V dP = nRT \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} \quad \text{.....(9-51)}$$

$$= nRT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{.....(9-52)}$$

ويمكن إعادة كتابة المعادلة اعلاه بالشكل التالي :

$$G - G^0 = nRT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{.....(9-53)}$$

بتطبيق هذه المعادلة على التفاعلة (49) فإن من الممكن كتابة مايلي :

$$aG^0A + aRT \ln P_A = aG_A = A \quad \text{(أ) الطاقة الحرة لـ } a \text{ مول من}$$

$$bG^0B + bRT \ln P_B = bG_B = b \quad \text{(ب) الطاقة الحرة لـ } b \text{ مول من}$$

$$cG^0C + cRT \ln P_C = cG_C = c \quad \text{(ج) الطاقة الحرة لـ } c \text{ مول من}$$

$$dG^0D + dRT \ln P_D = dG_D = d \quad \text{(د) الطاقة الحرة لـ } d \text{ مول من}$$

بتعويض هذه العلاقات في المعادلة (9-53) والخذ بنظر الاعتبار المعادلة

التالية :

$$\Delta G = G_{\text{product}} - G_{\text{reactant}}$$

$$\Delta G = cGC + dGD - aGA - bGB$$

$$= cGC^0 + dGD^0 - aGA^0 - bGB^0 + RT \ln \frac{(P_C)^c (P_D)^d}{(P_A)^a (P_B)^b}$$

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{(P_C)^c (P_D)^d}{(P_A)^a (P_B)^b} \quad \dots\dots\dots(9-54)$$

وبتعويض المعادلة (9-50) في المعادلة (9-54) وتحت ظروف التوازن :

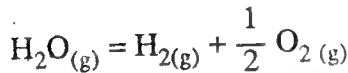
$$\Delta G = 0 = \Delta G^0 + RT \ln K_{eq}$$

فتكون  $G^0$

$$\Delta G^0 = RT \ln K_p \quad \dots\dots\dots(9-55)$$

حيث يشير  $K_p$  الى كمية ثابت التوازن عند استعمال الضغوط للمتفاعلات والنواتج .

مثال : احسب قيمة  $\Delta G^0$  و  $k_p$  في درجة 1227° للتفاعل :



علماً ان قيمة  $\Delta H^0 = 238.9 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

الحل :

قيم  $(G^0 - H^0)/T$  — نستخرج من الجدول (9-2) وفي درجة 1500°K



$$-\Delta \left( \frac{G^\circ - H_0^\circ}{T} \right) = 148.9 + \frac{1}{2} (225.1) - 211.7 = 49.75 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\Delta G^\circ - \Delta H_0^\circ = - (1500 \text{ K}) (49.75) = - 74625$$

$$\Delta G^\circ = 238900 - (1500) (49.75) = 164.275 \text{ J mol}^{-1}$$

من المعادلة (9-55)

$$\ln K_p = - \frac{164275}{8.314 \times 1500} = -13.17256$$

$$\therefore K_p = 1.9 \times 10^{-6}$$

## 12-9 دالة الطاقة الحرة Free Energy Function

باستخدام انتروبيات القانون الثالث والمعلومات الطيفية يمكن الوصول الى صيغة أكثر ملائمة لحساب ثابت التوازن وتسمى بدالة الطاقة الحرة  $G_T^\circ - H_0^\circ / T$  ، هذه الدالة لا تتغير كثيراً مع تغير درجة الحرارة ( جدول 2.9 ) ويمكن ان نكتب معادلة تبين الفرق بين دالة الطاقة الحرة للنواتج والمتفاعلات :

$$\Delta \left( \frac{\bar{G}_T^\circ - \bar{H}_0^\circ}{T} \right) = \frac{\Delta G_T^\circ}{T} - \frac{\Delta H_0^\circ}{T}$$

وبترتيب المعادلة ينتج :

$$\frac{\Delta G_T^\circ}{T} = \frac{\Delta H_0^\circ}{T} + \Delta \left( \frac{\bar{G}_T^\circ - \bar{H}_0^\circ}{T} \right)$$

ولما كانت العلاقة بين طاقة جيبس الحرة وثابت التوازن هي :

$$\Delta G_T^\circ = - RT \ln K$$

وبتعويض هذه العلاقة في المعادلة ينتج :

$$\ln K = 2.303 \log K = - \frac{1}{R} \left[ \frac{\Delta H_0^\circ}{T} + \Delta \left( \frac{\bar{G}_T^\circ - \bar{H}_0^\circ}{T} \right) \right]$$

$-(G^\circ - H^\circ_0) / T \text{ (JK}^{-1} \text{ mol}^{-1})$						$H^\circ_{298} - H^\circ_0$	$\Delta H^\circ_0$
	293K	500K	1000K	1500K	2000K	(kJ mol <sup>-1</sup> )	(kJ mol <sup>-1</sup> )
Elements							
Br <sub>2</sub> (g)	212.8	230.1	254.4	269.1	279.6	9.73	45.7
C(g)	136.1	147.3	162.0	170.6	176.6	6.53	711.3
C(graphite)	2.23	4.85	11.6	17.5	22.5	1.05	0
Cl <sub>2</sub>	192.2	208.6	231.9	246.2	256.6	9.18	0
F <sub>2</sub>	173.1	188.7	214.0	224.8	235.0	8.83	0
H <sub>2</sub>	102.2	116.9	137.0	148.9	157.6	8.47	0
I <sub>2</sub> (g)	226.7	244.6	269.4	284.3	295.1	10.12	65.5
N <sub>2</sub>	162.4	177.5	197.9	210.4	219.6	8.67	0
O <sub>2</sub>	176.0	191.1	212.1	225.1	234.7	8.66	0
S(g)	145.4	157.1	172.7	181.7	188.0	6.66	274.8
Various compounds							
Cl <sub>2</sub> O	228.7	250.1	282.8	303.5	318.8	11.7	89.5
HF	144.9	159.8	179.9	191.9	200.6	8.60	-271.1
HCl	157.8	172.8	193.1	205.4	214.3	8.64	-92.1
HBr	169.6	184.6	205.0	217.4	226.5	8.65	-28.6
HI	177.4	192.4	213.0	225.5	234.8	8.66	28.7
H <sub>2</sub> O(g)	155.5	172.8	196.7	211.7	223.1	9.91	-238.9
H <sub>2</sub> S	172.3	189.7	214.6	230.8	243.1	9.98	-17.7
NH <sub>3</sub>	159.0	176.9	203.5	222.1	236.9	10.06	-38.9
NO	179.8	195.6	217.0	230.0	239.5	9.18	90.4
N <sub>2</sub> O	187.7	205.4	233.0	251.6	265.9	9.59	85.5
NO <sub>2</sub>	205.7	224.0	251.4	269.5	283.0	10.31	35.9
SO <sub>2</sub>	212.6	231.7	260.6	279.6	294.0	10.54	-294.3
SO <sub>3</sub>	217.4	239.5	276.0	301.1	320.5	11.70	-390.0
Gaseous carbon compounds							
CO	168.4	183.5	204.1	216.6	225.9	8.673	-113.80
CO <sub>2</sub>	182.3	199.5	226.4	244.7	258.8	9.364	-393.17
COS	198.3	216.7	245.8	265.3	279.9	9.92	-137
CS <sub>2</sub>	202.0	221.9	253.2	273.8	289.1	10.07	116.6
CH <sub>4</sub>	152.5	170.5	199.4	221.1	238.9	10.03	-66.82
CH <sub>3</sub> Cl	199.5	218.8	251.1	275.2	294.9	10.41	-78.03
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	230.5	252.8	291.0	314.5	340.3	11.86	-89.0
CHCl <sub>3</sub>	248.1	275.3	321.1	352.7	377.1	14.18	-98.3
CCl <sub>4</sub>	251.9	285.3	340.2	376.7	404.0	17.24	-98.8
COCl <sub>2</sub>	240.6	265.0	304.6	331.1	351.1	12.87	-217.1
CF <sub>4</sub>	218.7	243.7	288.0	319.7	344.3	12.73	-927.9
CH <sub>3</sub> OH	201.4	222.3	257.7	-	-	11.43	-190.2
CH <sub>2</sub> O	185.1	203.1	230.6	250.2	266.0	10.01	-104.7
HCOOH	212.2	232.6	267.7	293.6	314.4	10.88	-371.4

From G.N. Lewis and M. Randall Thermodynamics, 2nd ed. revised by K.S.Pitzer and L.Brewer (New York McGraw Hill Book Co., 1961) through courtesy of Professors Pitzer and Brewer.

	$-(G^\circ - H^\circ_0) / T \text{ (JK}^{-1} \text{ mol}^{-1})$					$H^\circ_{298} - H^\circ_0$	$\Delta H^\circ_0$
	293K	500K	1000K	1500K	2000K	(kJ mol <sup>-1</sup> )	(kJ mol <sup>-1</sup> )
HCN	170.8	187.7	213.4	230.7	244.0	9.234	136±8
CN	173.5	188.5	209.2	221.8	231.0	8.673	456±12
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	167.3	186.2	217.6	239.5	256.6	10.01	227.3
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	184.0	203.7	239.1	266.7	289.7	10.52	60.73
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	189.4	212.4	255.7	290.6	—	11.95	-69.12
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	245.0	262.8	314.8	356.1	—	14.2	-217.4
CH <sub>3</sub> CHO	221.1	245.5	288.8	—	—	12.84	-155.4
CH <sub>3</sub> COOH	236.4	264.6	317.6	357.1	—	13.75	-418.3
CH <sub>3</sub> CN	202.9	225.8	265.5	—	—	12.10	94.47
CH <sub>3</sub> NC	204.3	228.1	268.7	—	—	12.66	1.56
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	221.5	248.2	299.4	340.7	—	13.54	35.4
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	220.6	250.2	310.0	359.2	—	14.69	-81.50
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	240.2	272.1	331.5	378.8	—	16.27	-201
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	244.9	284.1	362.3	426.6	—	19.44	-99.04
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	234.6	271.8	348.9	412.7	—	18.89	-106.5
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	270.0	317.7	413.7	292.5	—	23.55	-114.3
iso-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	269.3	315.0	409.9	488.6	—	22.15	-120.2
neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	235.8	280.5	371.6	455.7	—	21.04	-133.4
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	221.5	252.0	320.4	378.4	—	14.23	100.4
cyc-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	238.8	277.8	371.3	455.2	—	17.73	-83.72

من هذه المعادلة يمكن حساب قيمة التوازن K عند معرفة قيمة  $\Delta H^\circ$  اضافة الى قيم دالة الطاقة الحرة .

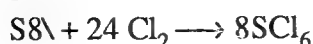
### 13-9 اعتماد طاقة كبس الحرة على مدى التفاعل :

### Dependence of Gibbs Free Energy on the rate of reaction

يمكن ان نعطي رمزاً لمدى التفاعل بـ  $\xi$  وسنأخذ التفاعل التالي كمثال لحساب مدى التفاعل .

مثال :

مائة غرام من  $\text{Cl}_2$  حولت الى  $\text{SCl}_6$  بواسطة التفاعل التالي :



ما هو مدى التفاعل ؟

الحل :

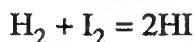
بما ان الوزن الجزيئي للكلور 70.9 لذلك يكون عدد مولات  $\text{Cl}_2$  الداخلة في التفاعل كما يلي :

$$\frac{100 \text{ g}}{70.90 \text{ g mol}^{-1}} = 1.410 \text{ mol}$$

ان مدى التفاعل يساوي عدد المولات  $\text{Cl}_2$  المتحولة الى العدد الستوكيومترتي لغاز الكلور :

$$\xi = \frac{1.41 \text{ mol}}{24} = 0.0588 \text{ mol}$$

ويصبح التفاعل ممكناً عندما يكون اتجاه التغير نحو تخفيض الطاقة الحرة والعكس هو الصحيح . ويمكن حساب مدى التفاعل للعديد من التفاعلات وفي درجات حرارة مختلفة ، والان لو اخذنا التفاعل التالي في درجة 100 K



في بداية التفاعل فان مدى التفاعل يساوي صفراً، وان المعلومات المتوفرة للطاقة الحرة لكبس هي :

$$G^{\circ}(\text{H}_2) = -137.0 \text{ KJ mol}^{-1}$$

$$G^{\circ}(\text{I}_2) = -203.9 \text{ KJ mol}^{-1}$$

$$G^{\circ}(\text{HI}) = -184.9 \text{ KJ mol}^{-1}$$

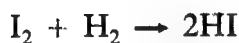
اذا كان الضغط الاول 1 atm فبعد بداية التفاعل فان ضغط كل من  $\text{I}_2$  و  $\text{H}_2$  يساوي 0.5 atm لذلك :

$$\begin{aligned} G(\text{H}_2) &= G^{\circ} + RT \ln \frac{P}{P_0} = -137000 + 8.314 \times 1000 \ln \frac{1}{2} \\ &= -142.8 \text{ KJ mol}^{-1} \end{aligned}$$

وبنفس الطريقة فان قيمة  $G(\text{I}_2) = 209.7 \text{ KJ mol}^{-1}$  والان هنالك مول واحد من كل منهما لذلك عندما يكون مدى التفاعل صفراً

$$G = -142.8 + (-209.7) = -352.5 \text{ KJ mol}^{-1}$$

والان لنحسب قيمة G عندها يبدأ التفاعل بحيث ان مدى التفاعل يساوي 0.2 لذلك فان :



$\xi = 0$  1mol 1mol 0 mol قبل التفاعل

$\xi = 0.2$  0.8 mol 0.8 mol 0.4 mol بعد التفاعل

لذلك فان :

$$n_{\text{H}_2} = 0.8 \text{ mol} , P_{\text{H}_2} = \left(\frac{0.8}{2.0}\right) P_{\text{total}}$$

$$n_{\text{I}_2} = 0.8 \text{ mol} , P_{\text{I}_2} = \left(\frac{0.8}{2.0}\right) P_{\text{total}}$$

$$n_{\text{HI}} = 0.4 \text{ mol} , P_{\text{HI}} = \left(\frac{0.4}{2.0}\right) P_{\text{total}}$$

## 15-9 العلاقة ما بين $K_p$ و $K_c$ و $K_x$ :

### Relationship between $K_x$ , $K_c$ , and $K_p$

في بعض الاحيان من المفضل استخدام الكسور المولية او التراكيز لحل معادلة ثابت التوازن خاصة بالنسبة للمحاليل . ويمكن ايجاد علاقة ما بين كل من هذه الثوابت اذا استعملنا الضغوط الجزئية للمواد واذا مثلنا  $\Delta G^\circ$  بالمعادلة التالية :

$$\Delta G^\circ = RT \ln \left( \prod_i P_i^{v_i} \right)_{eq} \quad \dots\dots\dots(9-63)$$

$$= -RT \ln K_p \quad \dots\dots\dots(9-64)$$

اي ان :

$$K_p = \left( \prod_i P_i^{v_i} \right)_{eq} \quad \dots\dots\dots(9-65)$$

حيث ان  $\pi_i$  يمثل حاصل ضرب الضغوط الجزئية  $P_i$  لمختلف الغازات وكل منها مرفوع للقوة التي تقابل معاملها الستوكيوميتري  $v_i$  في المعادلة المتوازنة . اذا عوضنا  $p = cRT$  في المعادلة (9-65) ينتج

$$K_p = K_c (RT)^{\sum v_i} \quad \dots\dots\dots(9-66)$$

حيث ان

$$K_1 C = \prod_i (c_i)^{v_i}_{eq} \quad \dots\dots\dots(9-67)$$

وان  $\sum v_i$  تمثل الفرق بين عدد مولات النواتج الغازية وعدد مولات المتفاعلات الغازية . اذا كان عدد مولات المتفاعلات مساو لعدد النواتج الغازية فان  $\sum v_i = 0$  لذلك فان المعادلة (9-66) تصبح :

$$K_p = K_c \quad \dots\dots\dots(9-68)$$

من الممكن ايضاً استخدام  $K_x$  ، حيث  $x_i$  تشير الى الكسور المولية وباستخدام نفس صيغة المعادلة (9-63) يمكن ان تكتب :

$$K_x = \prod_i (x_i)_{eq}^{v_i} \quad \dots\dots\dots(9-69)$$

ويمكن كتابة معادلة تمثل العلاقة بين  $K_x$  و  $K_p$

$$K_p = \prod_i (x_i p)_{eq}^{v_i} = P^{\sum v_i} \prod_i (x_i)_{eq}^{v_i} \quad \dots\dots\dots(9-70)$$

$$= P^{\sum v_i} K_x$$

حيث يمثل  $p$  الضغط الكلي للغازات المتفاعلة. اذا كانت  $\sum v_i = 0$  فان بقية ثابت التوازن  $K_x$  تعتمد على الضغط كما وضحت ذلك المعادلة (9-70).

### 16-9 طريقة تعيين $K_p$ : Determination of $K_p$

ان طريقة تعيين  $K_p$  غير معقدة على الصعيد النظري ولكنها تحتاج الى خبرة وعناية عملية. وفي البداية يجري تحضير مزيج معلوم من الغازات ويسمح لها بالوصول الى حالة التوازن عند درجة حرارة ثابتة  $T_1$  ويمكن بعد ذلك تعيين تركيب مزيج الغازات المتفاعلة والناجمة عند حالة التوازن، وفي بعض الاحيان فان التفاعل عند الحجم الثابت يسبب تغييراً في الضغط كمثال على ذلك التفاعل  $SO_2 + 1/2 O_2 = SO_3$ . ان الضغط في بودقة التفاعل يتغير كلما اتجه التفاعل الى اليمين. وفي هذه الحالة اذا كان تركيب الخلطة قبل التفاعل معروف فان قياس الضغط عند التوازن، يسمح لنا لحساب المتفاعلات والنواتج عند التوازن، ولنفترض بان الخليط يحتوي على  $a$  مول من غاز  $SO_2$  و  $b$  مول من غاز الاوكسجين لذلك فان الضغط الاول للخليط سيكون:

$$P_1 = \frac{(a + b) RT}{V} \quad \dots\dots\dots(9-71)$$

اذا تكون  $X$  مول من  $SO_2$  عند التوازن فان عدد المولات المتبقية من  $SO_2$  تساوي  $(a-x)$  وعدد المولات من الاوكسينين يساوي  $(b-1/2x)$  ويمكن الان حساب عدد المتبقية بعد انتهاء التفاعل،

(ب) :

وبنفس الطريقة

$$1.5 \text{ mol} = b, \quad 1 = a$$

$$a - x = 1 - 0.21 = 0.79 \text{ mol}$$

$$b - x = 1.5 - 0.79 = 0.71 \text{ mol}$$

بتعويض هذه القيم في ثابت التفاعل :

$$K_2 = \frac{(1)(1.5)}{(0.71)(0.79)} = 2.67$$

$$a = 1 \text{ mol}, \quad b = 4 \text{ mol}$$

$$x = 0.07$$

$$a - x = 0.93 \text{ mol}$$

$$b - x = 4.0 - 0.93 = 3.07$$

بتعويض هذه القيم في ثابت تفاعل ينتج :

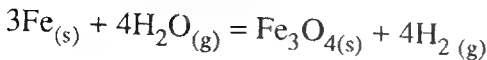
$$K_3 = \frac{(1)(4)}{(0.93)(3.07)} = 1.4$$

يمكن الآن استخراج معدل قيمة ثابت التوازن  $K_{av}$  :

$$K_{av} = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$$
$$= \frac{9.18 + 2.67 + 1.4}{3} = 4.42$$

مثال :

عندما وضع مزيج من الحديد وبخار الماء حتى وصولاً درجة التوازن عند  $900^\circ\text{C}$ . وجد أن ضغط التوازن الهيدروجيني والماء كما يلي :  $0.0095 \text{ atm}$  و  $0.0065 \text{ atm}$  على التوالي . احسب ( أ ) ثابت التوازن للتفاعل التالي :





(ب) نسبة الماء التي اختزلت اذا ادخل بخار الماء في 1 atm الى دورق حديدي حتى درجة التوازن ( ج ) احسب قيمة G لهذا التفاعل .

الحل :

( أ ) يمكن كتابة التوازن كما يلي :

$$K = \frac{[H_2]^4}{[H_2O]^4} = \frac{(0.0095)^4}{(0.0065)^4} = 4.54$$

(ب) عندما يكون الضغط البدائي لـ  $H_2O(g)$  يساوي 1 atm مقدار الماء المتحول الى هيدروجين  $x$

ضغط الهيدروجين عند التوازن  $x \text{ atm}$

ضغط بخار الماء عند التوازن  $(1-x) \text{ atm}$

$$K = \frac{(x)^4}{(1-x)^4} = 4.54$$

$$\frac{x}{1-x} = (4.54)^{\frac{1}{4}}$$

$$x = 1.46 (1-x)$$

$$2.46 x = 1.46$$

$$\Delta G^\circ = RT \ln K_p \quad (\text{ج})$$

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= -1.987 \times (900 - 273) \times 2.303 \log 4.54 \\ &= -3526.9 \text{ cal mol}^{-1} \end{aligned}$$

وهذه القيمة تمثل التغير في طاقة كبس الحرارة للتفاعل المذكور اعلاه .

(ج) للفرع (ب) احسب الضغوط الجزئية للمتفاعلات والناتج عند التوازن.

$$K_p = \frac{\alpha^3 P}{(2\alpha)(1-\alpha)^2} \quad \text{الجواب: (أ)}$$

$$0.474 \text{ mole} = n_{H_2}, \quad 1.526 \text{ mole} = n_{H_2S} \quad \text{(ب)}$$

$$0.737 \text{ mole} = n_{S_2} \quad \text{و}$$

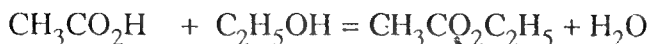
$$0.173 \text{ atm} = P_{H_2}, \quad 0.558 \text{ atm} = P_{H_2S} \quad \text{(ج)}$$

$$0.269 \text{ atm} = P_{S_2} \quad \text{و}$$

12 — مزيج من ثلاث غازات ضغطها الكلي 90 atm في درجة 300 K ، تحتوي على ثلاث مولات من كل غاز . اذا كان معامل الفعالية عند هذا الضغط للغازات الثلاثة على التوالي هو 0.76 و 0.92 و 1.16 ما هي النشاطية الهروبية لغاز A في هذا المزيج؟

الجواب : 22.8 atm

13 — للتفاعل التالي



فان قيمة  $K = 4$  . احسب كمية الاثر الناتج اذا كان مزيج مولين من الحامض ومولين من القاعدة وخمسة مولات من الماء في توازن .

الجواب : 0.87

14 — في 300 K وضغط 1 atm بتفكك  $CO_2$  بحدود 40 بالمائة الى CO و

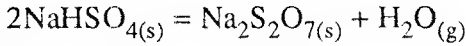
$O_2$  ( أ ) ما هي درجة التفكك اذا ارتفع الضغط الى 2 atm (ب) ما هي

نسبة التفكك اذا سخن مزيج من 50 بالمائة  $CO_2$  و 50 بالمائة اوكسجين

الى 300 K وعند ضغط جوي واحد؟

الجواب : ( أ ) 0.335 (ب) 0.271

15 — للتفاعل التالي :

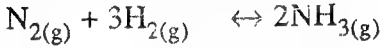


إذا علمت بأن  $\Delta G^\circ = 19.8 \text{ Kcal mol}^{-1}$  ,  $\Delta H^\circ = 19.8 \text{ Kcal mol}^{-1}$

احسب ضغط التفكك لمادة  $\text{NaHSO}_4$  في  $700 \text{ K}$

الجواب :  $55.3 \text{ atm}$

16 — عند درجة حرارة معينة فإن الضغوط الجزئية عند التوازن للتفاعل التالي :



إذا كانت الضغوط الجزئية عند التوازن لهذا التفاعل هي :

$$1.25 \text{ atm} = P_{\text{NH}_3} , 4.12 \text{ atm} = P_{\text{H}_2} , 6.84 \text{ atm} = P_{\text{N}_2}$$

احسب  $K_p$

الجواب :  $0.11$

17 — محلول من  $\text{BaCl}_2$  فيه كل  $60 \text{ cc}$  تحتوي على  $0.39 \text{ gm}$  من  $3\text{aCl}_2$

درجة  $15^\circ$  . إذا علمت بأن  $60$  بالمائة من الملح المذاب يتفكك وأن

الجزئي للمادة هو  $208$  . احسب الضغط الأزموزي للملح المتفكك .

الجواب :  $1.6236 \text{ atm}$

# الفصل العاشر

## Solutions المحاليل

### 1-10 المخاليل

يعرف المحلول بأنه مزيج متجانس من مادتين أو أكثر أو طور واحد يحتوي على أكثر من مادة، ربما يكون المحلول غاز أو سائل أو صلب. وتمتزج الغازات جميعها وبأية نسبة. وتستطيع المواد الصلبة والسائلة اذابة كميات متباينة من الغازات. وقد تكون حدود الذوبانية صغيرة أو كبيرة وتعتمد على نوع المنظومة، وإن أى مادتين تمتزجان بشكل طبيعي يقال انهما قابلتان للامتزاج، فالماء والكحول الميثيلي مثلاً يمتزجان بمختلف النسب، بينما يعتبر الزيت قليل الذوبان جداً في الماء.

إن أهم الطرق التي تصف محتويات المحلول من الناحية النظرية هي باستخدام الكسر المولي، فالمحلول الحاوي على  $n_A$  مول من مادة A و  $n_B$  من المادة B، و  $n_C$  من المادة C... الخ. له كسر مولي من A ممثلاً بـ  $x_A$ :

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B + n_C + \dots} \quad \dots\dots\dots(10-1)$$

والمنظومة المكونة من مادتين A و B يكون الكسر المولي للمادة A:

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad \dots\dots\dots(10-2)$$

أما المولارية فهي أكثر الوحدات المستعملة للتعبير عن التركيز ويرمز لها بالحرف M وتعرف بأنها عدد المولات من المذاب لكل  $dm^3$  من المحلول.

ان استعمال المولالية لا يخلو من نقص ذلك لان درجة الحرارة مثلا تؤدي الى تغير في الحجم، اضافة الى تغير كمية المذيب مع التركيز المولارى، لذلك فقد استعملت طريقة اخرى للتعبير عن التركيز للتغلب على النقص الموجود في استعمال التركيز المولارى وهي طريقة التركيز المولالي  $m$ ، حيث تعرف المولالية بأنها عدد مولات المذاب لكل كيلوغرام واحد من المذيب، وتعتبر المولالية  $(m)$  اكثر دقة للتعبير عن التراكيز من المولالية  $(M)$ . واذا كان لدينا محلول ذو مكونتين وان مولالية المادة B مثلا وهي احدى مكونات المحلول معلومة  $(m_B)$  فان الكسر المولي لـ B يمكن ان يحسب من

$$x_B = \frac{m_B}{(1/M_A) + m_B} = \frac{m_B M_A}{1 + m_B M_A} \quad \dots\dots\dots(10-3)$$

حيث تمثل  $M_A$  الوزن الجزيئي للمادة A ( مكونة المحلول الثانية ) وتعطى الكتل بالكيلوغرام عندما يكون تركيز B صغيرا فان حاصل ضرب  $m_B M_A$  يكون صغيرا مقارنة مع الواحد الصحيح، لذلك فان الكسر المولي يتناسب بشكل تقريبي مع المولالية،  $x_B \approx m_B M_A$

في المحلول المائي فان من المفيد أن نذكر ان  $M_A = 0.018 \text{ kg.mol}^{-1}$  وان 1 kg من الماء يحتوى على 55.5 مول.

## 2-10 قانون راؤولت والمحلول المثالي

### Raoult Law, The ideal solutions

أجرى العالم ف. م. راؤولت في عام 1886 مجموعة من التجارب بقياس الضغوط الجزئية لمحتويات المحاليل، ووجد بأنه لبعض المحاليل الحاوية على مكونتين فان الضغط البخارى لمكونات المحلول يعطى كمايلي:

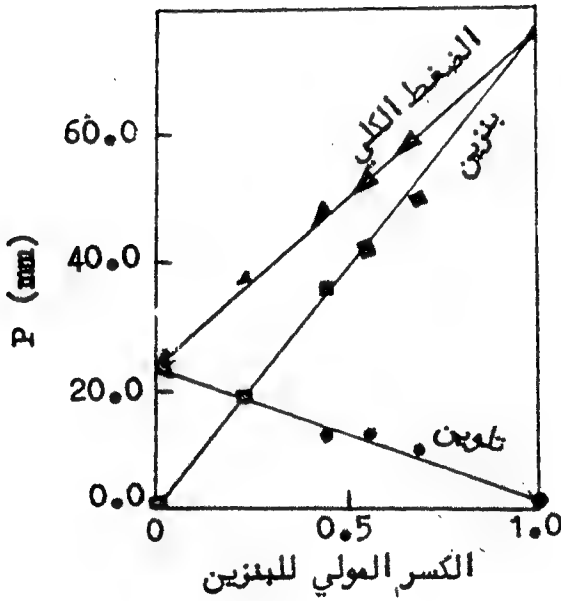
$$P_A = X_B P_A^0, \quad P_B = X_B P_B^0 \quad \dots\dots\dots(10-4)$$

حيث  $P_A$  و  $P_B$  تمثلان الضغوط الجزئية للمكونات، و  $X_A, X_B$  يشيران الى

الكسرين الموليّان  $P_A^\circ$  و  $P_B^\circ$  هما الضغطان البخاريان لكل من A و B في  
الحالة النقية على التوالي.

تعرف المعادلة (4-10) بقانون رافولت، وإن المحلول الذي يخضع لقانون  
رافولت يعرف بالمحلول المثالي.

يشير المخطط (1-10) إلى الضغط البخاري لمحلول مثالي « تقريباً » ويحتوى  
على بنزين وتولوين مرسوم مقابل الكسر المولي.



المخطط رقم (1-10): العلاقة بين الضغط البخاري الكلي والجزئي لمكونات محلول مثالي بدلالة  
الكسر المولي.

وتختلف فكرة المحلول المثالي من نواحي عديدة عن فكرة الغاز المثالي فبالنسبة للغاز المثالي وعلى المستوى الجزيئي فإنه يوصف بالانعدام الكلي للمفاعلة البينية بين الجزيئات  $(\partial U / \partial V)_T = 0$ .

أما المحاليل المثالية فتتميز بالانتظام التام للقوى الداخلية، وفي المحلول المكون من A و B، فإن القوى بين جزيئات A تكون مساوية للقوى بين جزيئات B ومن ناحية أخرى فالمحلول المثالي احتوائه على جزيئات متشابهة بالشكل العام والحجم والشكل، فالبنزين والتولوين متشابهان تقريباً. وقد تكون جزيئات  $H_2O$  و  $D_2O$  محلولاً مثالياً.

فكما تنطبق فكرة الغاز المثالي بدقة في حدود الضغط القليل (أو الحجم المولارى الكبير) فإن فكرة المحلول المثالي تنطبق في حدود الكميات القليلة من المذاب (أو ان كميات المذيب تكون كبيرة).

### الدينامية الحرارية للمحاليل المثالية

#### Thermodynamics of ideal Solutions

ان المحلول الذي يحتوى على مادتين لكل منها ضغط بخارى، في حالة التوازن (P,T ثابتان) فإن الجهد الكيميائي للحالة السائلة يساوى نظيره في الحالة البخارية أى أن:

$$\mu_A^l = \mu_A^{vap} \quad \dots\dots\dots(10-5)$$

$$\mu_B^l = \mu_B^{vap} \quad \dots\dots\dots(10-6)$$

وتنطبق هاتان المعادلتان على المحاليل سواء كانت حقيقية أم مثالية وان الجهد الكيميائي للحالة البخارية يعطى بالمعادلة:

$$\mu = RT \ln f$$

حيث  $f$  تمثل الضغط الفعال (Fugacity)

$$\mu_A^1 = RT \ln f_A \quad \dots\dots\dots(10-7)$$

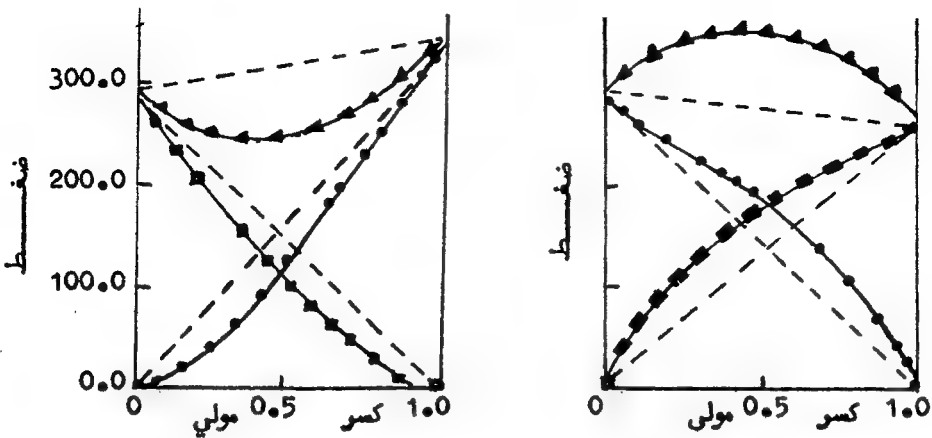
$$\mu_B^1 = RT \ln f_B$$

من المعلومات اعلاه يمكن كتابة قانون راؤولت بالصورة التالية وذلك باعتبار الضغط الفعال  $f$

$$\left. \begin{aligned} f_A &= x_A f_A^0 \\ f_B &= x_B f_B^0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10-8)$$

حيث  $f^0$  تمثل الضغط الفعال للمادة في الحالة النقية. وإذا كان للمنظومة ضغط بخاري معتدل (1 جو أو أقل)، فسيكون بإمكاننا أن نفترض بأن البخار فوق السائل تصرف كغاز مثالي، حيث  $f = p$ .

ان اعتماد الضغط البخاري للمحلول غير المثالي معطى بالشكل (10-2):



الشكل (10-2): مخطط الضغط البخاري لمحلول غير مثالي يشير الى الانحراف عن قانون راؤولت. الخط المتقطع يشير الى قانون راؤولت (A) يشير الى مجموعة كلوروفورم - اسيتون في درجة 35° ويشير الى انحراف سالب. (B) مجموعة CS<sub>2</sub> - كحول مثيلي.



### 3-10 الكميات المولارية الجزئية Partial Molar Quantities

نأخذ على سبيل المثال المحيط الاطلسي كونه محلول مكون من ملح الطعام في الماء. ولنسأل السؤال التالي: افترض اننا اضفنا مول واحد من NaCl للمحيط. ماهي محصلة التغير في حجم المحيط. واذا كان  $n_A$  يمثل عدد مولات المذيب و  $n_B$  عدد مولات المذاب، فان التغير في حجم المحيط يكون

$$v = \bar{V}_B = \left( \frac{\partial v}{\partial n_B} \right)_{T,P,n_A} \quad \dots\dots\dots(10-9)$$

$V_B$  يسمى الحجم المولارى الجزئى للمكون B. ويمثل التغير في الحجم الذي يتكون في المحلول، وعلى الاساس المولارى، عند اضافة كميات تفاضلية من احد المكونات على ان يكون الضغط ودرجة الحرارة وبقية عدد المولات ثابتة.

ان الكميات المولارية الجزئية يمكن تعريفها بنفس الطريقة التي تعرف بها دالة حالة شاملة Extensive state function.

وعلى سبيل المثال:

$$\bar{S}_A = \left( \frac{\partial S}{\partial n_A} \right)_{T,P,n_B} \quad \dots\dots\dots(10-10)$$

$$\bar{H}_A = \left( \frac{\partial H}{\partial n_A} \right)_{T,P,n_B} \quad \dots\dots\dots(10-11)$$

$$\bar{G}_A = \left( \frac{\partial G}{\partial n_A} \right)_{T,P,n_B} \quad \dots\dots\dots(10-12)$$

حيث تشير  $n_B$  الى ان عدد مولات المكونة B يبقى ثابتا.

## 4-10 المحلول المثالي الذي يحتوى على مادتين طيارتين

عندما تكون مادتان A و B متطايرتين مكونتين لمحلول يسلك بخارهما كغاز مثالي، فإن الضغط الكلي للبخار المتوازن مع المحلول هو مجموع الضغطين البخاريين لمكونتي المحلول اللتين تخضعان لقانون راؤولت، وعليه فإن الضغط البخاري الكلي يعطي بالمعادلة التالية:

$$P_{\text{tot}} = X_A P_A^{\text{C}} + (1 - X_A) P_B^{\text{O}} \quad \text{.....(10-13)}$$

حيث أن  $P_A$  و  $P_B$  تشيران إلى الضغوط البخارية للمواد A و B في الحالة النقية على التوالي وأن

$$X_B = (1 - X_A)$$

وبما أن الضغط الجزئي للمكونة A في الطور البخاري يرتبط بالضغط الكلي  $P_{\text{tot}}$  وبكسره المولي  $Y_A$  وفق قانون دالتون:

$$P_A = Y_A P_{\text{tot}} \quad \text{.....(10-14)}$$

فمن المعادلة رقم (4-10) يمكننا أن نكتب:

$$Y_A P_{\text{tot}} = X_A P_A^{\text{O}} \quad \text{.....(10-15)}$$

وبتعويض  $P_{\text{tot}}$  في المعادلة (10-13) نحصل:

$$Y_A = \frac{X_A P_A^{\text{O}}}{X_A P_A^{\text{O}} + (1 - X_A) P_B^{\text{O}}} \quad \text{.....(10-16)}$$

وهكذا نلاحظ أن مكونات الطور البخاري تختلف عن تلك الموجودة في المحلول الذي هو في حالة توازن معه.

من المعادلة (10-13) يمكننا استنتاج المعادلة التالية:

$$X_A = \frac{P_{\text{tot}} - P_B^0}{P_A^0 - P_B^0} \quad \dots\dots\dots(10-17)$$

## 5-10 قانون هنرى Henry's Law

لاحظ هنرى ان وزن الغاز المذاب في وحدة حجم من المذيب يتناسب مع الضغط الجزئي للغاز فوق السائل، أو ان الضغط الجزئي للغاز المذاب يتناسب مع كسره المولي كما مبين في المعادلة:

$$P_B = k X_B \quad \dots\dots\dots(10-18)$$

حيث  $X_B$  يشير الى الكسر المولي للغاز B في المحلول عندما يكون ضغطه الجزئي فوق السائل  $P_B$ .

و k ثابت، ويختلف باختلاف نوع المحلول الثنائي ويطلق عليه ثابت قانون هنرى.

وعند مقارنة المعادلة (10-18) مع المعادلة (10-4) نحصل على:

$$P_B^0 X_B = k X_B$$

ويمكن القول بأن للمحلول المثالي يكون الثابت k في معادلة هنرى هو نفس الضغط البخارى للمكون الذي له قابلية اكثر للتطاير في نفس درجة الحرارة ( ان هذه لا تنطبق لغير المحاليل المثالية ).

## 6-10 المحاليل غير المثالية Non-Ideal Solutions

يكون الضغط الكلي للبخار فوق المحلول اكبر أو اقل من القيمة المحسوبة وفق المعادلة (10-13). وكذلك يمكن ملاحظة تغير واضح في الحرارة والحجم عند

تكوين محلول غير مثالي. وإن المحاليل بصورة عامة تقترب من المثالية كلما اقترب تركيز المذاب من الصفر.

إن الانحراف عن المثالية له علاقة مباشرة بالقيم النسبية للقوى بين جزيئات المحلول، فالانحراف الموجب عن قانون راؤولت والذي يكون فيه الضغط الكلي للبخار أعلى من المحسوب وفق قانون راؤولت ( الشكل 10-1) يتكون عندما تكون القوى بين الجزيئات A و B صغيرة مقارنة بالقوى بين جزيئات المادة A أو B ومثال على ذلك محلول كبريتيد الكاربون والكحول. وأما الانحراف السالب فانه يكون عندما يكون الضغط الكلي المحسوب وفق قانون راؤولت أعلى من الضغط الكلي الحقيقي وينتج هذا عندما تكون القوى بين A و B أعلى من القوى بين جزيئات A أو B. يكون الانحراف السالب عادة في المحاليل التي تحوى على مواد ذات قطبية عالية أو عندما تكون هناك آصرة هيدروجينية بين مكونات المحلول. مثال على ذلك هو محلول الاستون والكلوروفورم. وهنا يمكن ادخال الفعالية ومعامل الفعالية.

## 7-10 الدينامية الحرارية للمحاليل المثالية

### Thermodynamics of Ideal Solutions

سندرس في هذا الحقل المتغيرات الدينامية الحرارية المصاحبة لتكون محاليل الغازات المثالية والمحاليل المتباينة للسوائل، وهذا يعتبر المدخل المناسب لدراسة المحاليل الحقيقية وصفاتها.

يوصف المحلول المثالي بأنه المحلول الذي يكون حجمه مساوياً لحجوم المواد المكونة للمحلول قبل المزج على فرض ثبوت درجة الحرارة والضغط ويعبر عنه كما يلي:

$$\Delta V_{\text{mix}} = 0 \quad \dots\dots\dots(10-20)$$

ويمكن توضيح هذا من فهم الحقيقة التالية وهي عندما يكون حجم مول واحد من كل من A و B هو  $V_A$  و  $V_B$  على التوالي. فإن  $V$  لمحلول مثالي يكون:

$$V = n_A \bar{V}_A + n_B \bar{V}_B \quad \text{.....(10-21)}$$

ان حجم مول واحد من المحلول، المحلول الذي فيه مجموع عدد المولات مساو للواحد يمكن الحصول عليه بالقسمة على  $(n_A + n_B)$

$$\bar{V}_{(sol)} = x_A \bar{V}_A + x_B \bar{V}_B \quad \text{.....(10-22)}$$

وتعتبر المعادلتان (20-10) و (21-10) من المعادلات التي تصف المحاليل المثالية السائلة.

### 8-10 انثالبية المحلول المثالي The Enthalpy of an Ideal Solution

من الميزات الاجرى للمحلول المثالي هو عدم وجود تغير في المحتوى الحرارى عند مزج مكونات المحلول عند ضغط ثابت، أى أن:

$$\Delta H_{mix} = 0 \quad \text{.....(10-23)}$$

لقد وجد عمليا بأن مزج معظم الغازات ( عند ضغط ليس عال ) يخضع للمعادلة (23-10) وكذلك فان مزج سوائل متشابهة بالصفات يحدث تأثير حرارى بسيط جداً.

اذا كانت الانثالبية المولارية لكل من مكونات المحلول يرمز لها بـ  $\Delta H_f^\circ(A)$  و  $\Delta H_f^\circ(B)$  فان حرارة التكوين القياسية للمحلول  $H_f(sol)$ ، يمكن ان تكتب كما يلي:

$$\Delta H_{mix} = \Delta H_f^\circ(sol) - [n_A \Delta H_f^\circ(A) + n_B \Delta H_f^\circ(B)] = 0 \quad \text{.....(10-24)}$$

$$\Delta H_f^\circ(soln) = n_A \Delta H_f^\circ(A) + n_B \Delta H_f^\circ(B)$$

وان حرارة تكوين مول واحد من المحلول هي

$$\Delta H_f^{\circ}(\text{sol}) = x_A \Delta H_f^{\circ}(\text{A}) + x_B \Delta H_f^{\circ}(\text{B}) \quad \dots\dots\dots(10-25)$$

يشار في المعادلات اعلاه على القيم المولارية بالحروف الكبيرة المصغرة.

### 9-10 انتروبية المحلول المثالي Entropy of an Ideal Solution

ان انتروبي الغازات المثالية يعتمد على الضغط ودرجة الحرارة ( تؤخذ المعادلة من السابق ) وان انتروبي الغاز عند تمدده من حجم معين الى حجم نهائي V وهو حجم المزيج الغازي فان مساهمة كل غاز يكون :

$$\Delta S_A = n_A R \ln \frac{V}{V_A}$$

$$\Delta S_B = n_B R \ln \frac{V}{V_B}$$

وان التغير الكلي في الانتروبي المصاحب لعملية المزج تكون :

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{mix}} &= \Delta S_A + \Delta S_B \\ &= n_A R \ln \frac{V}{V_A} + n_B R \ln \frac{V}{V_B} \quad \dots\dots\dots(10-26) \end{aligned}$$

وباستعمال معادلة الغازات المثالية :

$$V_A = n_A RT / P, \quad V_B = n_B RT / P, \quad V = (n_A + n_B) RT / P$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{mix}} &= n_A R \ln \frac{n_A + n_B}{n_A} + n_B R \ln \frac{n_A + n_B}{n_B} \\ &= - n_A R \ln \frac{n_A}{n_A + n_B} - n_B R \ln \frac{n_B}{n_A + n_B} \end{aligned}$$

$$= - n_A R \ln x_A - n_B R \ln x_B \quad \dots\dots\dots(10-27)$$

ولتكوين 1 مول من المحلول فان المعادلة اعلاه تقسم على  $n_A + n_B$

$$S_{mix} = - x_A R \ln x_A - n_B R \ln x_B \quad \dots\dots\dots(10-28)$$

تمثل المعادلة (10-28) التغير في الانتروبي المصاحب لتكوين 1 مول من محلول سواء كان غاز أو سائل .

ان قيمة الانتروبي لـ  $x_A$  مول من A هو  $x_A S_A$  ولـ  $x_B$  مول، يكون  $x_B S_B$  . ولمول واحد من المحلول المثالي .

$$\begin{aligned} \Delta S_{mix} &= s_{(soln)} - s \quad ( \text{مكونات} ) \\ s_{(soln)} &= \Delta S_{mix} + s \quad ( \text{مكونات} ) \\ &= - x_A R \ln x_A - x_B R \ln x_B + x_B + x_A S_A^0 + x_B S_B^0 \\ &= x_A (S_A^0 - R \ln x_A) + x_B (S_B^0 - R \ln x_B) \quad \dots\dots\dots(10-29) \end{aligned}$$

وان مساهمة كل مكون في تغير الانتروبي

$$\begin{aligned} S_A (soln) &= S_A^0 - R \ln x_A \\ S_B (soln) &= S_B^0 - R \ln x_B \quad \dots\dots\dots(10-30) \end{aligned}$$

## 10-10 طاقة كبس الحرة لمحلول مثالي

### Gibbs Free Energy of an Ideal Solution

ان المتغير في طاقة كبس الحرة المصاحب لتكوين محلول مثالي، وعند ضغط درجة حرارة ثابتين فأن:

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad \dots\dots\dots(10-31)$$

وبالاستعانة بالمعادلة (10-23) و (10-27) نحصل على:

$$\Delta G_{mix} = n_A RT \ln x_A + n_B RT \ln x_B \quad \dots\dots\dots(10-32)$$

ان طاقة كبس الحرة لـ  $n_A$  مول من A و  $n_B$  مول من B تعطى محاصيل

الجمع

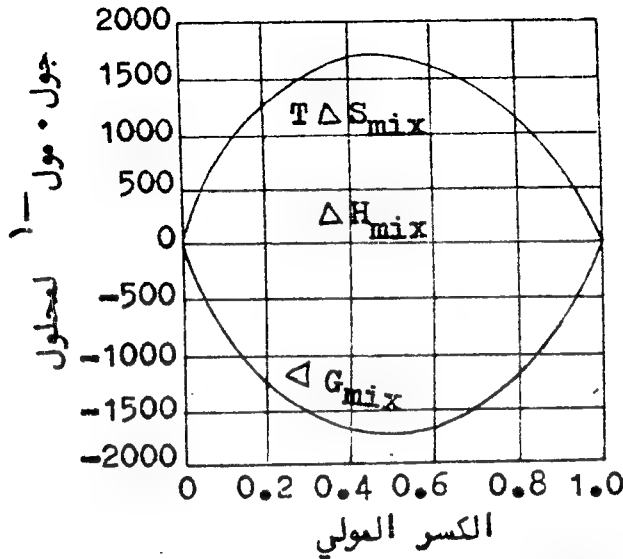
$$n_A \Delta G_f^\circ(A) + n_B \Delta G_f^\circ(B)$$

ثم نحصل على التغير في طاقة كبس الحرة للمحلول:

$$\begin{aligned} \Delta G_{(sol)} &= n_A [\Delta G_f^\circ(A) + RT \ln x_A] + n_B [\Delta G_f^\circ(A) + RT \ln x_B] \\ \Delta G_{(sol)} &= x_A [\Delta G_f^\circ(A) + RT \ln x_A] + x_B [\Delta G_f^\circ(B) + RT \ln x_B] \end{aligned} \quad (10-33)$$

وان مساهمة مكونات المحلول في طاقة كبس الحرة تكون:

$$\begin{aligned} \Delta G_{(soln)} &= \Delta G_f^\circ(A) + RT \ln x_A \\ \Delta G_{(soln)} &= \Delta G_f^\circ(B) + RT \ln x_B \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(10-34)$$



الشكل (10-3): مخطط التغيرات في الدوال الترموديناميكية لتكوين 1 مول من محلول مثالي



## 11-10 الصفات الدينامية الحرارية للمحلول الحقيقي

### Thermodynamic properties of Real Solution

ان الصفات الدينامية الحرارية للمحلول الحقيقي  $\Delta H_{mix}$  و  $\Delta V_{mix}$  يمكن قياسها مباشرة وان قيم  $\Delta G_{mix}$  و  $\Delta S_{mix}$  يمكن حسابها من قيم الضغوط البخارية المتوفرة.

ان طاقات كبس الحرة المولارية لابخرة السوائل التي ستكون المحلول ستكون مساوية لطاقة كبس الحرة للسوائل نفسها والتي تكون في حالة توازن مع الابخرة. وان طاقة كبس الحرة المولارية لبخار المحلول تكون مساوية لطاقة كبس الحرة المولارية للمحلول نفسه والمتوازن مع البخار، لذلك فان الحصول على  $\Delta G$  لتكوين بخار المحلول من ابخرة مكونات المحلول، سيمكننا من تعيين هذه القيمة (  $\Delta G$  ) للمحلول نفسه.

ان فائدة هذه الطريقة هي امكانية معاملة الابخرة كغازات مثالية وعلى هذا الاساس يمكن معرفة مساهمة كل مكون في تغير طاقة كبس الحرة للمزيج في الحالة البخارية كما يلي:

فبالنسبة الى  $x_A$  مول من المكون A في حالة البخار تكون

$$\Delta G_{mix}(A) = x_A RT \ln \frac{P_A}{P_A^o} \quad \dots\dots\dots(10-35)$$

وبالنسبة الى  $x_B$  مول من المكون B في طور البخار فان:

$$\Delta G_{mix}(B) = x_B RT \ln \frac{P_B}{P_B^o} \quad \dots\dots\dots(10-36)$$

وعليه يكون تغير طاقة كبس الحرة للمزيج البخارى كما يلي:

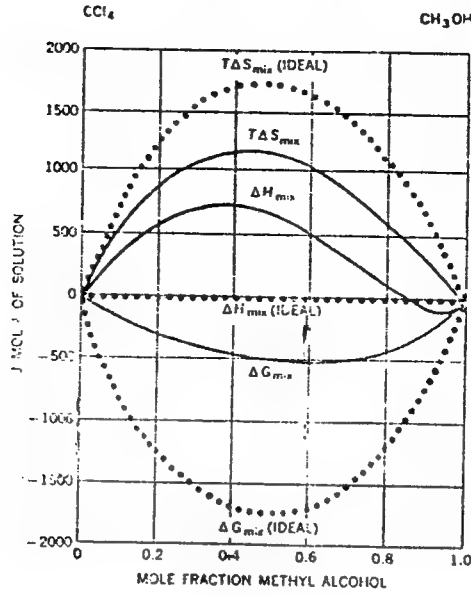
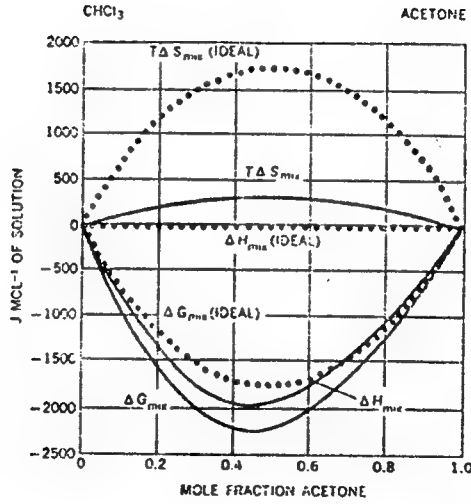
$$\Delta G_{mix} = RT (x_A \ln \frac{P_A}{P_A^o} + x_B \ln \frac{P_B}{P_B^o}) \quad \dots\dots\dots(10-37)$$

تمثل  $P_A$  و  $P_B$  في هذه المعادلة الضغظان البخاريان للمكونين A و B فوق المحلول الذي يحوى على كسرين موليين مقدارهما  $x_A$  و  $x_B$  من كل منهما. وتمثل  $P_A^\circ$  و  $P_B^\circ$  الضغظان البخاريان لكل من A و B في الحالة النقية يمكن الحصول على قيم الضغوط البخارية المطلوبة في المعادلة (10-37).

وأخيراً فإن  $S_{mix}$  أو  $T S_{mix}$  يتم الحصول عليها من المعادلة

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad \text{.....(10-38)}$$

ان قيم الضغوط البخارية تستعمل مع قيم الانثالبية لاعطاء مخطط القيم الدينامية الحرارية ( الرسم 10-4) الذي يوضح القيم الدينامية لمحلول مثالي ومحلول حقيقي.



المخطط (4-10): التغيرات في الدوال الترموديناميكية لتكوين محاليل حقيقية.

الدينامية الحرارية م ٢٢/

## 12-10 طاقات كبس الحرة لمكونات المحلول: المذبيات

ان التغير في طاقة كبس الحرة الذي يحدث عند مزج  $n_A$  مع  $n_B$  من مكونات محلول له ضغط جزئية  $P_A$  و  $P_B$ :

$$\Delta G_{\text{mix}} = n_A RT \ln \frac{P_A}{P_A^0} + n_B RT \ln \frac{P_B}{P_B^0} \quad \dots\dots\dots(10-39)$$

وكذلك يمكن ان يعبر عن  $\Delta G_{\text{mix}}$  بدلالة المكونات النقية والمحلول كما في هذه المعادلة:

$$\Delta G_{\text{mix}} = (n_A \bar{G}_A + n_B \bar{G}_B) - (n_A G_A^0 + n_B G_B^0) \quad \dots\dots\dots(10-40)$$

$$\bar{G}_A = \left( \frac{\partial G}{\partial n_A} \right)_{n_B} \quad , \quad \bar{G}_B = \left( \frac{\partial G}{\partial n_B} \right)_{n_A} \quad \text{حيث}$$

وان  $G_A$  و  $G_B$  تشيران الى طاقة كبس الحرة المولارية للمكونات غير الممتزجة وتمثلان طاقة كبس الحرة القياسية للتكوين.

يمكن ان تصبح المعادلتين (10-39) و (10-40) بالشكل التالي:

$$n_A \bar{G}_A + n_B \bar{G}_B = n_A G_A^0 + n_A RT \ln \frac{P_A}{P_A^0} + n_B G_B^0 + n_B RT \ln \frac{P_B}{P_B^0} \quad (10-41)$$

ولذلك فان

$$\bar{G}_A = G_A^0 + RT \ln \frac{P_A}{P_A^0} \quad \dots\dots\dots(10-42)$$

$$\bar{G}_B = G_B^0 + RT \ln \frac{P_B}{P_B^0} \quad ,$$

يمكن الحصول على قيم  $G_A$  و  $G_B$  من قيم الضغوط البخارية المتوفرة اذا كان A يمثل المذيب ويفرض أن المحلول مخفف ( قانون راؤولت اعتماده ):

$$x_A = P_A / P_A^0$$

وتكون المعادلة (10-42)

$$\bar{G}_A = G_A^0 + RT \ln x_A \quad \dots\dots\dots(10-43)$$

تستعمل المعادلة (10-43) للمحاليل المثالية والحقيقية المخففة، ولكن في حالات المحاليل الحقيقية وفي التركيز العالي. فأن من الأنسب ادخال الفعالية (a) والتي تكون مساوية لـ  $P_A/P_A^0$  لذلك فان طاقة كبس الحرة المولارية الجزئية للمحاليل الحقيقية سوف تكون:

$$\bar{G}_A = G_A^0 + RT \ln a_A \quad \dots\dots\dots(10-44)$$

ونتوقع ان تقترب  $a_A$  الى  $x_A$  للمذيب في المحلول المخفف، لذلك فسيكون من المناسب ان ندخل معامل الفعالية والذي يعطى في العلاقة:

$$\gamma = \frac{a_A}{x_A} \quad a_A = \gamma x_A$$

### 13-10 طاقات كبس الحرة لمكونات المحلول: المذاب

للمحاليل التي يكون المذاب فيها صلب أو غاز ويوجد بكميات قليلة، في هذه الحالة يمكن استعمال قانون هنرى والذي ينص على ان الضغط البخارى يتناسب مع الكسر المولي للمذاب، وكذلك فان الكسر المولي والتركيز المولالي يتناسب احدهما مع الاخر كلما يصبح المحلول اكثر تخفيفاً. وان قانون هنرى يصبح:

$$P_B = k x_B \quad \text{أو} \quad P_B = k' m \quad \dots\dots\dots(10-45)$$

حيث  $x_B$  و  $m$  يمثلان الكسر المولي والمولالية للمكون  $B$  على التوالي. و  $k$  و  $k'$  هما ثابتا قانون هنرى.

ان الفرق بين الطاقة الحرة المولالية الجزئية للمذاب في تركيزين مختلفين يمكن ان يكتبها بدلالة الضغط البخاري للمذاب في محلولين:

$$(\bar{G}_B)_2 - (\bar{G}_B)_1 = RT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \dots\dots\dots(10-46)$$

وبافتراض ان يكون تركيز المحلولين واطيء جداً بحيث يمكن ان يحققا قانون راؤولت، فانه باستعمال المعادلة (10-45) يكون:

$$(\bar{G}_B)_2 - (\bar{G}_B)_1 = RT \ln \frac{x_2}{x_1} \quad \dots\dots\dots(10-47)$$

أو

$$(\bar{G}_B)_2 - (\bar{G}_B)_1 = RT \ln \frac{m_2}{m_1}$$

لأجل التقدم اكثر في اشتقاق قيم الدينامية الحرارية للمذاب، يجب أن نفكر باختيار مرجع يستعمل لمقارنة طاقات كبس الحرة المولالية الجزئية للمذاب. ان المادة الصلبة النقية لا تكون مناسبة لان صفات المذاب النقي يختلف عن صفاته عندما يستعمل كمذاب لتكوين محلول ولذلك فانه لايمكن ان يستعمل في المسائل المتعلقة بالمحاليل.

للمواد المذابة لتكوين محاليل تخضع لقانون هنرى وباستعمال المعادلة (10-47)، فان من المناسب ان نختار تركيزا قيمته (1) مولال كحالة قياسية. لذلك يمكن كتابة:

$$\bar{G}_B = \bar{G}_B^{\circ} + RT \ln m \quad \dots\dots\dots(10-48)$$

حيث  $G_B$  تمثل طاقة كبس الحرة المولالية الجزئية للمذاب في محلول تركيز (1 m) وكذلك  $m$  تمثل نسبة المولالية الى مولالية واحدة .

وكمثال لايحاد قيمة طاقة كبس الحرة للحالة القياسية تعطى حالة محلول الاوكسجين في الماء . حيث أن ذوبان الاوكسجين في الماء عند ضغط 1 جو و  $25^\circ$  هو 0.00115 مول في 1000 غرام من الماء، حيث يكون  $O_{2(g)}$  عند 1 جو في توازن مع  $O_{2(aq)}$  عند تركيز 0.00115 مولال، وإن طاقة كبس الحرة للاوكسجين المذاب عند هذا التركيز تكون مساوية للاوكسجين غير المذاب، وإن طاقة كبس الحرة القياسية لتكوين الاوكسجين تساوي صفراً، ولذلك فإن طاقة كبس الحرة للتكوين  $\Delta G_f^\circ$  ، بالنسبة لتركيز 0.0015 مولال هي ايضاً تساوى صفراً وباستعمال المعادلة (10-48) تكون:

$$0 = \Delta \bar{G}_f^\circ [O_{2(aq)}] + 2.3 (8.31) (298.15) \log 0.00115$$

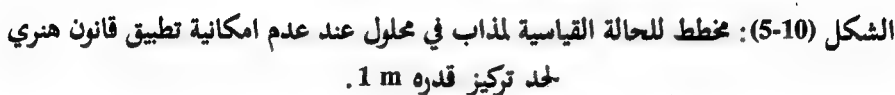
$$\Delta \bar{G}_f^\circ [O_{2(aq)}] = 16780 \text{ J}$$

و  
لذلك فإن طاقة كبس الحرة التي يجب أن يملكها الاوكسجين حتى يكون عند تركيز قدرة 1 مولال في درجة  $25^\circ$  تكون مساوية 16780 J وعند تركيز آخر فإن الطاقة الحرة المولالية تكون:

$$\Delta \bar{G}_f = 16780 + RT m \ln j$$

النتيجة ذات قيمة مهمة لحساب التغير في الطاقة الحرة ولموقع التوازن بعدد من التفاعلات الحياتية والطبيعية التي تحدث في المحاليل المائية المشتملة على الاوكسجين المذاب .

كما في حالة الغازات فإن الطريقة المتبعة هي اختيار حالة قياسية كحالة نظرية يملكها المذاب اذا كان قانون راؤولت يطبق لحد محلول تركيزه 1 m . هذه الطريقة تقترح بيانها كما في الشكل (10-5):



ان الحالة القياسية للمذاب يمكن تعريفها بكونها ذات فعالية واحدة ويمكن أن تكتب:

حيث  $G_B^\circ$  تمثل طاقة كبس الحرة المولالية الجزئية للحالة القياسية، أي قيمة  $G_B$  عندما تكون  $a_B = 1$ . وبمقارنة المعادلة رقم (10-48) مع (10-49) وبإدخال معامل الفعالية  $\gamma = (a_B/m)$ ، وسيكون بالإمكان كتابة المعادلة بالشكل التالي:

۳۴۲



## 14-10 فعالية المذاب من صفات المذيب: تطبيق لمعادلة كبس — دهام

ان الفكرة هي تطوير علاقة بين طاقات كبس الحرة لمذاب مفرد والمذيب في المحلول وان العلاقة المستعملة هي:

$$dG = \bar{G}_A dn_A + \bar{G}_B dn_B$$

حيث

$$\bar{G}_A = \left( \frac{\partial G}{\partial n_B} \right)_{n_B}, \quad \bar{G}_B = \left( \frac{\partial G}{\partial n_A} \right)_{n_A}$$

ان سرعة تغير الطاقة الحرة للمحلول مع اضافة المذيب A تعطى للمعادلة

التالية:

$$\frac{dG}{dn_A} = \bar{G}_A + \bar{G}_B \frac{dn_B}{dn_A} \quad \dots\dots\dots(10-51)$$

يمكن الحصول على 51-10 من تفاضل المعادلة:

$$G = n_A \bar{G}_A + n_B \bar{G}_B \quad \text{بالنسبة الى } n_A$$

حيث

$$\frac{dG}{dn_A} = n_A \frac{d\bar{G}_A}{dn_A} + \bar{G}_A + n_B \frac{d\bar{G}_B}{dn_A} + \bar{G}_B \frac{dn_B}{dn_A} \quad \dots\dots\dots(10-52)$$

ومن مقارنة المعادلتين (51-10) (52-10) نحصل على معادلة

كبس — دهام

$$n_A \frac{d\bar{G}_A}{dn_A} = -n_B \frac{d\bar{G}_B}{dn_A} \quad \dots\dots\dots(10-53)$$

ويمكن أن نحصل على شكل آخر من هذه العلاقة وذلك بقسمة البسط

والمقام في طرفي المعادلة (53-10) على  $n_A + n_B$  للحصول على الكسر المولي:

$$x_A \frac{d\bar{G}_A}{dx_A} = -x_B \frac{d\bar{G}_B}{dx_A} \quad \dots\dots\dots(10-54)$$

ان الطاقة الحرة الجزئية المولارية للممذيب او المذاب يمكن ان تكون

$$\bar{G} = \bar{G}^{\circ} + RT \ln a$$

وكذلك

$$\frac{d \bar{G}_A}{dx_A} = RT \frac{d (\ln a_A)}{dx_A}$$

و

$$\frac{d \bar{G}_B}{dx_B} = RT \frac{d (\ln a_B)}{dx_A}$$

وبالمقارنة مع المعادلة (10-54) نحصل على

$$x_A \frac{d (\ln a_A)}{dx_A} = - x_B \frac{d (\ln a_B)}{dx_A} \quad \dots\dots\dots(10-55)$$

أو

$$d (\ln a_B) = - \frac{x_A}{x_B} d (\ln a_A) \quad \dots\dots\dots(10-56)$$

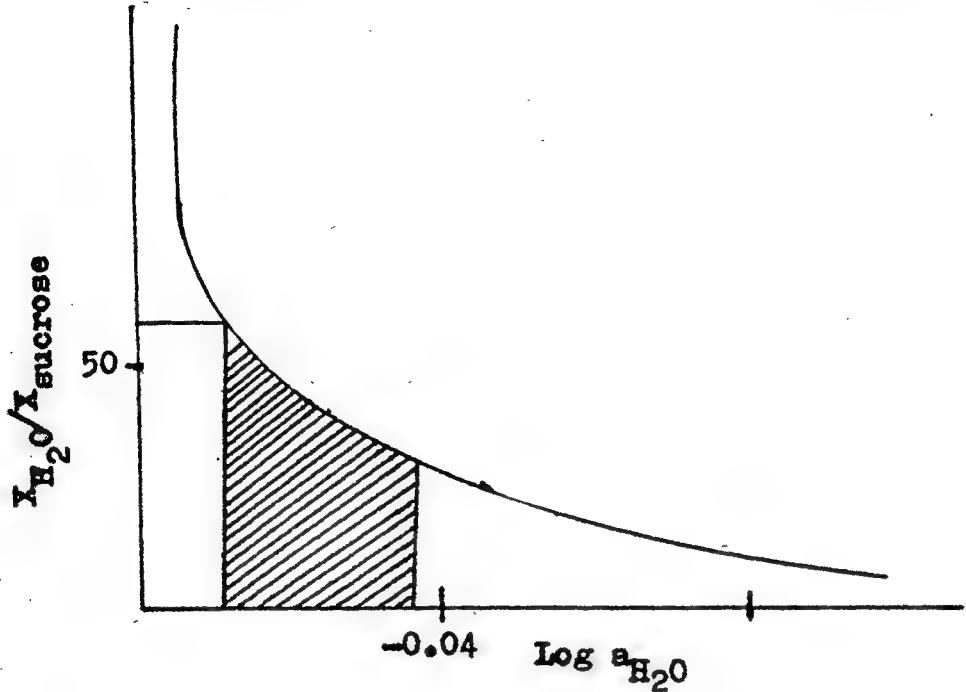
وبالتكامل نحصل على:

$$\ln \frac{a_B''}{a_B'} = - \int_{a_B'}^{a_B''} \frac{x_A}{x_B} d (\ln a) \quad \dots\dots\dots(10-57)$$

أو

$$\log \frac{a_B'}{a_B''} = \int_{a_B'}^{a_B''} \frac{x_A}{x_B} d (\log a_A) \quad (10-58)$$

ويمكن إجراء التكامل بطريقة الخط البياني كما في الشكل (6-10)



الشكل (6-10): المخطط لتكامل المعادلة (58) لمجموعة ماء. سكروز عند درجة 0° المنطقة المخططة تستعمل للحصول على الفروق بين فعالية المذاب بين الكسور المولية للمذاب.

## 15-10 الخواص المترابطة Colligative properties

من المعلوم ان يكون سلوك المحاليل أقرب الى المثالية كلما زاد تخفيفها وبالتالي تسهل دراسة صفاتها. هناك أربع صفات خاصة بالمحلول المثالي تعرف بالصفات الترابطية والتي تلعب دوراً مهماً في تطوير الكيمياء الفيزيائية لأنها تساعد على حساب الأوزان الجزيئية للمواد غير المتغايرة. وهذه الصفات هي الانخفاض في الضغط البخاري والارتفاع في درجة الغليان والانخفاض في درجة الانجماد أو الضغط التنافذي. وان قيم هذه الصفات في المحاليل المخففة تعتمد فقط على تركيز المذاب وليس على الصفات الكيميائية.

## 1- الانخفاض في الضغط البخاري Vapor pressure lowering

يمكن الحصول على الانخفاض النسبي للضغط البخاري في المحاليل التي تخضع لقانون راؤولت بالطريقة التالية:

$$\begin{aligned}\Delta P_A &= P_A^0 - P_A \\ &= P_A^0 - x_A P_A^0\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(10-59)$$

حيث  $P_A^0$  الضغط البخاري للمادة A في الحالة النقية في درجة حرارة  $\Gamma$  وان  $P_A$  الضغط البخاري للمادة A في المحلول. باعادة ترتيب المعادلة (10-59) تصبح بالشكل:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta P_A}{P_A^0} &= 1 - x_A = x_B \\ x_B &= \frac{W_B / M_B}{\frac{W_A}{M_A} + \frac{W_B}{M_B}}\end{aligned}\quad \text{ولما كان فعليه تصبح هذه المعادلة كما يلي:}$$

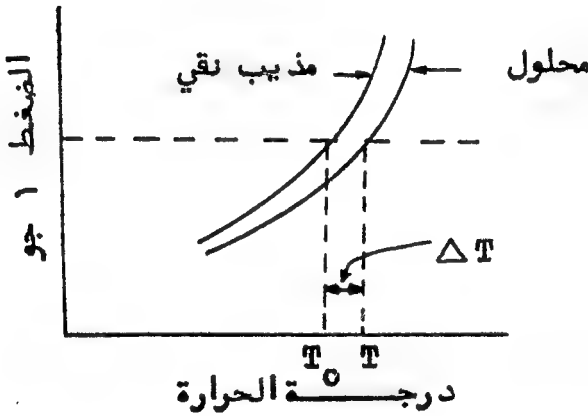
$$\frac{\Delta P_A}{P_A^0} = \frac{W_B / M_B}{\frac{W_A}{M_A} + \frac{W_B}{M_B}} \quad \dots\dots\dots(10-60)$$

حيث  $W_A$  و  $W_B$  تمثلان وزن كل من المادتين A و B في المحلول وان  $M_A$  و  $M_B$  هما الوزنان الجزيئيان للمكونين A و B على التوالي اذا كان B يمثل المذاب المراد تعيين وزنه الجزيئي واذا افترضنا ان المحلول مخفف بحيث ان  $n_B$  أقل بكثير من  $n_A$ ، فسوف يكون بالامكان اهمال الحد الثاني في المقام بحيث تكون المعادلة (10-60) كالتالي:

$$M_B = \frac{W_B M_B}{W_A} \cdot \frac{P_A^0}{\Delta P_A} \quad \dots\dots\dots(10-61)$$

## 2- الارتفاع في درجة الغليان Boiling-point elevation

يمكن تعريف درجة غليان السائل على انها درجة الحرارة التي عندها يتساوى الضغط البخارى للسائل مع الضغط الجوى. ان العلاقة بين الضغط البخارى مع درجة الحرارة توضح بالخطط التالي ( مخطط 10-7) والذي يشير الى العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة، وبسبب كون الضغط البخارى للمحلول المخفف لمذاب غير طيار يكون دائماً أقل من الضغط البخارى للمذيب النقي في نفس درجة الحرارة، فان المحلول يجب ان يتجه نحو درجة حرارة أعلى من المذيب النقي حتى يصبح ضغطه البخارى مساو للضغط الجوى. ان هذا الارتفاع في درجة الغليان يعتمد على الانخفاض في الضغط البخارى وبالتالي على تركيز المذاب ( استنادا الى قانون راؤولت ).



الشكل (10-7) : مخطط تغير الضغط البخارى مع درجة الحرارة او درجة الغليان مع الضغط .

لاجل الحصول على علاقة بين الارتفاع في درجة الغليان والتركيز فاننا سنستعمل المعادلة التالية لمول واحد من المحلول عند درجة الغليان  $T$ .

$$\mu_{A(sol)} = \mu_A^{\circ}(l) + RT \ln x_A \quad \dots\dots\dots(10-62)$$

حيث  $\mu_A^{\circ}(l)$  هو الجهد الكيميائي للمذيب A النقي عند درجة T تحت ضغطه البخاري في الحالة النقية  $P_A^{\circ}$ .

واستناداً الى المعادلة (6-10) وعندما يكون الضغط الخارجي P ثابتاً ولان

$$\mu_{A(sol)} = \mu_{A(v)}$$

يمكننا الحصول على

$$\mu_{A(v)} = \mu_A^{\circ}(l) + RT \ln x_A \quad \dots\dots\dots(10-63)$$

$$\frac{\mu_{A(v)} - \mu_A^{\circ}(l)}{T} = R \ln x_A \quad \dots\dots\dots(10-64)$$

وعند ملاحظة العلاقة :

$$\left( \frac{\partial \left( \frac{\Delta G}{T} \right)}{\partial T} \right)_P = - \frac{H_{A(l)}}{T^2}$$

يتفاضل المعادلة (10-64) بالنسبة لـ T عند ضغط ثابت P تكون هذه العلاقة بالنسبة للسائل كما يلي :

$$\left( \frac{\partial \frac{\mu_A^{\circ}(l)}{T}}{\partial T} \right)_P = \frac{-H_{A(l)}}{T^2}$$

وللبخار بالشكل

$$\left( \frac{\partial \frac{\mu_{A(v)}}{T}}{\partial T} \right)_P = \frac{-H_{A(v)}}{T^2}$$

$$\frac{H_{A(v)} - H_{A(l)}}{T^2} = -R \left( \frac{\partial \ln x_A}{\partial T} \right)_P$$

حيث  $(H_A(v) - H_A(l))$  تمثل التغير في الانثالي لعملية التبخر لمول واحد من السائل النقي A عند درجة T. ويجب ان تكون  $\Delta H_{vap}$  للمادة النقية A عند  $T_0$  التي تمثل درجة الغليان للمادة النقية A عند ضغط P وعندئذ تصبح المعادلة (10-65) بالشكل التالي:

$$-d \ln x_A = \frac{\Delta H_{vap}}{RT^2} dT$$

وسوف يكون بالامكان الحصول على علاقة بين  $x_A$  و T بأخذ التكامل بين  $T_0$  و  $x_A=1$  لسائل نقي و T و  $x_A$  لمحلول وبافتراض ان  $\Delta H_{vap}$  ثابتة عند هذا الحد من تغير درجة الحرارة:

$$\begin{aligned} \ln x_A &= \frac{\Delta H_{vap}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad \dots\dots\dots(10-66) \\ &= \frac{\Delta H_{vap}}{R} \left( \frac{T_0 - T}{T_0 T} \right) \end{aligned}$$

وبتعويض  $T - T_0 = \Delta T$ ,  $x_A = 1 - x_B$  نحصل

$$\ln (1 - x_B) = - \frac{\Delta H_{vap}}{R} \frac{\Delta T}{T_0 T} \quad \dots\dots\dots(10-67)$$

ويمكن جعل المعادلة اعلاه بشكل اكثر ملائمة وذلك بالتعويض عن  $\ln(1-x_B)$  ب  $-x_B$  وهذا ممكن للمحاليل المخففة وكذلك فان  $T_0$  يساوي تقريباً T ويكون  $T T_0 = T_0^2$  وتكون المعادلة (10-67) كالتالي:

$$x_B = \frac{\Delta H_{vap}}{R} \frac{\Delta T}{T_0^2} \quad \dots\dots\dots(10-68)$$

ويسبب كون المحلول مخففاً وان  $x_B$  صغيرة مقارنة بالواحد الصحيح فان  $x_B$  تكون مساوية تقريباً الى  $n_B/n_A$  وبذلك فان (10-68) تصبح:

$$\Delta T = \frac{W_B M_A}{W_A M_B} \frac{RT_0^2}{H_{vap}} \quad \dots\dots\dots(10-69)$$

يمكن تبسيط المعادلة اعلاه اكثر باستعمال المولية  $m$  والتي يمكن كتابتها بالشكل التالي :

$$m = \frac{W_B}{W_B M_B} \times 1000$$

وسوف تكون المعادلة (10-69)

$$\Delta T = \frac{RT_0^2}{1000 h_v} m$$

حيث  $h_v$  حرارة تبخر غرام واحد من المذيب .

في المعادلة (107-70) كل القيم فيها ثابتة عدا  $m$  لذلك تصبح :

$$\Delta T = K_b m \quad \dots\dots\dots(10-71)$$

ويسمى  $K_b$  ثابت الارتفاع في درجة الغليان المولي .

جدول بثوابت الارتفاع في درجة الغليان المولاري عند ضغط ١ جو

المذيب	$K_b$
١- الماء	0.50
٢- الكحول المثيلي	0.83
٣- الكحول الايثيلي	1.22
٤- الاسيتون	1.73
٥- البنزين	2.53
الككلوروفورم	3.63



ونظراً للتقريب الذي تم إجراؤه عند اشتقاق المعادلة (10-71) فإن التناسب بين  $\Delta T$  و  $m$  يكون فقط صحيحاً للمحاليل المخففة ، وكذلك يوجد توافق بين القيمة النظرية لـ  $K_b$  وقيمة  $\Delta T/m$  المحسوبة . ولأجل حساب الوزن الجزيئي للمذاب مجهول من هذه المعادلات فإن المعادلة المناسبة تكون :

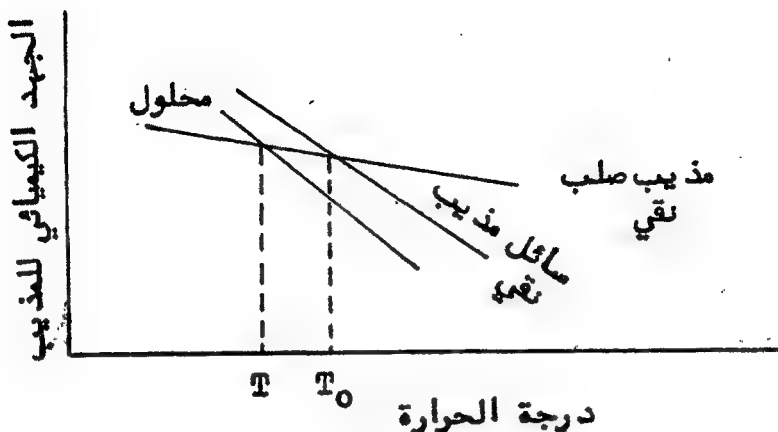
$$\Delta T = \frac{1000 K_b W_B}{W_A M_B} \quad \dots\dots\dots(10-72)$$

أو

$$M_B = \frac{1000 K_b W_B}{\Delta T W_A} \quad \dots\dots\dots(10-73)$$

### 3 — الانخفاض في درجة الانجماد Freezing-point depression

في حالة التوازن بين المحلول والمذيب الصلب النقي ، فإن الجهد الكيميائي للمذيب في كلا الطورين يجب ان يكون متساو ، كما موضح في الرسم (8-10) . ويتطلب هذا ان تكون حرارة التوازن اقل من نقطة انجماد المذيب النقي . للمحلول المثالي في ضغط محدد ، كالضغط الجوي مثلاً ، فإن المساواة بين الجهد الكيميائي للمذيب في الحالة الصلبة والسائلة يعطي بالمعادلة التالية :



الشكل (8-10) : مخطط للجهد الكيميائي لمذيب في طور صلب نقي ، طور عند سائل نقي ، ومحلول معتمداً على درجة الحرارة

$$\mu_A^{\circ}(s) = \mu_A^{\circ}(l) + RT \ln x_A \quad \text{.....(10-74)}$$

وبذلك تكون :

$$\frac{\mu_A^{\circ}(s) - \mu_A^{\circ}(l)}{T} = R \ln x_A \quad \text{(10-75)}$$

بتفاضل كلا الطرفين بالنسبة الى T عند ضغط ثابت P نحصل على :

$$R d \ln x_A = \frac{H_{A(l)} - H_{A(s)}}{T^2} dT \quad \text{.....(10-76)}$$

وهذه المعادلة يمكن ان تكتب بالصيغة التالية :

$$d \ln x_A = \frac{\Delta H_{AF}}{RT^2} \quad \text{.....(10-77)}$$

حيث  $H_{AF}$  تمثل حرارة انصهار المذيب النقي .

وعند تكامل هذه المعادلة بين  $T_c$  و  $x_A = 1$  للمذيب النقي و T و  $x_A$  للمحلول نحصل على هذه المعادلة :

$$\ln x_A = \frac{\Delta H_{AF}}{R} \left( \frac{T - T_0}{TT_0} \right) \quad \text{.....(10-78)}$$

وعند اجراء نفس التقريب السابق فان :

$$\Delta T = K_f m \quad \text{.....(10-79)}$$

حيث  $\Delta T = T - T_0$  وتمثل الانخفاض في درجة الانجماد، وان  $K_f$  يمثل ثابت الانخفاض في درجة الانجماد المولالي ويعطى بالصيغة التالية :

$$K_f = \frac{RT_0^2}{1000 h_f} \quad \text{(10-80)}$$

في هذه المعادلة فان  $h_f$  تمثل حرارة انصهار غرام من المذيب وان قيم  $K_f$  لعديد من المذيبات تعطى في الجدول التالي :

جدول رقم : ثابت الانخفاض المولالي لعدد من المذيبات

المذيب	$K_f$
١- الماء	1.85
٢- حامض الخليك	3.90
٣- البنزين	5.12
٤- الفينول	5.30
٥- النيتروبنزين	6.90

ان الوزن الجزيئي للمذاب مجهول B لحلول مخفف يعطي بالمعادلة :

$$M_B = \frac{1000 K_f W_B}{\Delta T W_A} \quad \dots\dots\dots(10-81)$$

اذا كان المذاب في المحلول يتفكك الى جزيئات او أيونات او اذا كانت جزيئات ثنائية او بوليمرات ، فان الوزن الجزيئي الذي نحصل عليه في هذه الطريقة هو عدد معدل الوزن الجزيئي ويعرف بانه مجموع كل الاجزاء الموجودة في المحلول من حاصل ضرب الوزن الجزيئي في الكسر المولي :

$$\bar{M} = \sum_i M_i X_i \quad \dots\dots\dots(10-82)$$

ان انخفاض درجة انجماد النموذج نسبة الى درجة انجماد المادة في الحالة النقية يكون مؤشراً لدرجة نقاوة النموذج .

## 16-10 التنافذ والضغط التنافذي Osmosis and Osmotic Pressure

ينبغي هنا البدء في التوازن الفيزيائي ، التوازن الذي يظهر في عمليات لا يوجد فيها تغير كيميائي ، وتشمل على محاليل وليست مادة واحدة . هناك بعض الصفات التي تدرس من خلال مقارنة طاقة كبس الحرة للمذيب في الحالة النقية وفي

المحلول ويمكن الحصول على طاقة كبس الحرة من فرق الطاقة بين بخار المذيب فوق المحلول وبخار المذيب فوق المذيب النقي كما في المعادلة التالية :

$$G_{A(\text{محلول})} - G_{A(\text{مذيب نقي})} = RT \ln \frac{P_A(\text{محلول})}{P_A(\text{مذيب نقي})} \quad (10 - 83)$$

بصورة عامة عند التعامل مع صفات مذيب ما فإن المذيب النقي يعتبر الحالة القياس وتكتب المعادلة الأخيرة بالشكل التالي :

$$G_A - G_A^{\circ} = RT \ln \frac{P_A}{P_A^{\circ}} \quad \dots\dots\dots(10-84)$$

ولاجل الانتقال من صفات التوازن البخاري الى حدود تراكيز المحاليل يجب ان تستعمل قانون راؤوليت، والذي يستعمل للمحاليل المثالية وللمحاليل الحقيقية المخففة ويكتب كما يلي :

$$P_A = x_A P_A^{\circ} \quad \dots\dots\dots(10-85)$$

حيث  $x_A$  يمثل الكسر المولي للمذيب. لذلك فإن الضغط البخاري للمذيب ينخفض كلما اضيفت كميات من المذاب ويمكننا هذا القانون من ان نستبدل  $P_A/P_A^{\circ}$  بالكسر المولي  $x_A$  في المعادلة (84-10) لنحصل على :

$$G_A - G_A^{\circ} = RT \ln x_A \quad \dots\dots\dots(10-86)$$

بما ان  $x_A$  يتغير من الواحد الى قيم اصغر كلما اضيفت كميات من المذاب، فان طاقة كبس الحرة للمذيب تكون اقل في المحلول مما هي عليه في المذيب النقي.

اذا اعتبرنا ان  $n_A$  يمثل عدد مولات المذيب وان  $n_B$  عدد مولات المذاب فان الكسر المولي هو :

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

وان المعادلة (86-10) تكون :

$$G_A = G_A^o + RT \ln \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad \dots\dots\dots(10-87)$$

ان الكمية التي ستكون لها فائدة هي

$$(\partial G_A / \partial n_B)_{T, n_A}$$

وتمثل التغير في طاقة كبس الحرة للمذيب لكل مول من المذاب المضاف عندما تكون درجة الحرارة T وعدد مولات المذيب ثابتين . وان هذه الكمية التي تعرف بالجهد الكيميائي يمكن الحصول عليها من المعادلة (10-87)

$$(\frac{\partial G_A}{\partial n_B})_{T, n_A} = RT \frac{\partial}{\partial n_A} (\ln \frac{n_A}{n_A + n_B}) \quad \dots\dots\dots(10-88)$$

$$= RT \frac{\partial}{\partial n_B} (\ln n_A - \ln (n_A + n_B)) \quad \dots\dots\dots(10-89)$$

$$= - RT \frac{\partial}{\partial n_B} (\ln (n_A + n_B))$$

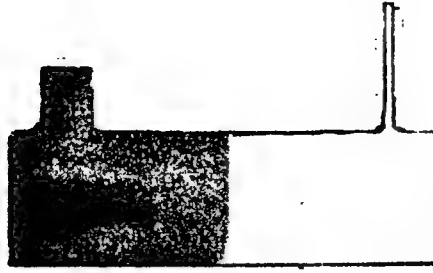
$$= - \frac{RT}{n_A + n_B} \quad \dots\dots\dots(10-90)$$

$$dG_A = - \frac{RT}{n_A + n_B} dn_B \quad \dots\dots\dots(10-91)$$

تضاف المعادلة (10-91) الى معادلة طاقة كبس الحرة لمكونة واحدة لنحصل على المعادلة التالية :

$$dG_A = V_a dP - S_A dT - \frac{RT}{n_A + n_B} dn_B \quad \dots\dots\dots(10-92)$$

لقد اعتمد الضغط التنافي على الفكرة المبينة في التصميم التالي :



#### المخطط (9-10)

ويعرف الضغط التنافذي بأنه الضغط الاضافي الذي يجب فرضه على المحلول بحيث ان المذيب لا تكون له القدرة على المرور في الاتجاهين عبر الغشاء نصف الناضح. وان هذا الضغط الاضافي يزيد طاقة كبس الحرة للمذيب في المحلول بحيث انها تتحول الى قيمة مساوية لطاقة كبس الحرة للمحلول. ان طاقة كبس الحرة للمذيب في المحلول تنخفض كما مبين في المعادلة (10-86) نتيجة للمذاب الاضافي لان الوارد في المعادلة المذكورة ينخفض من  $x_A$  للمذيب النقي الى قيمة اقل عند اضافة المذاب. وبما ان المذيب الموجود في اناء المذيب النقي لا يتعرض الى قوى تغير من طاقته الحرة، فان التوازن يمكن ان يبقى فقط اذا كانت محصلة التغير في طاقة كبس الحرة للمذيب في حاوية المحلول تساوي صفراً. وبما ان درجة الحرارة تبقى ثابتة، فان الحد  $-S_A dT$  في المعادلة (10-92) يحذف من المعادلة لتصبح كالآتي:

$$V_A dP = \frac{RT}{n_A + n_B} dn_B \quad \dots\dots\dots(10-93)$$

بالتكامل ولايجاد ان الضغط المضاف والذي يجب تطبيقه عندما يضاف  $n_B$  مول من المذاب يمكن تبسيطه بافتراض ان  $n_B$  التي تمثل عدد مولات المذاب هي صغيرة مقارنة بـ  $n_A$  (عدد مولات المذيب). وبما ان  $n_A$  تكون ثابتة، لذلك فان مجموع  $(n_A + n_B)$  يكون تقريباً ثابتاً. وبافتراض ان الحجم المولاري للمذيب  $V_A$  هو ثابت القيمة وهو نفس القيمة التي يملكها في الحالة النقية بصورة تقريبية، لذلك فان المعادلة (10-93) تكون:

$$V_A \int_{P_{\text{solvent}}}^{P_{\text{solution}}} dP = \frac{RT}{n_A + n_B} \int_0^{n_B} dn_B \dots\dots\dots(10-94)$$

$$V_A (P_{\text{solution}} - P_{\text{solvent}}) = \frac{n_B}{n_A + n_B} RT$$

او

$$V_A \pi = x_B RT$$

تمثل  $\pi$  الضغط المضاف المسلط على المحلول وهو الضغط التنافذي .

هناك اختلاف في فهم للنتيجة اعلاه نحصل عليها بقرب المعادلة

(10-95) بـ  $n_A$  ، عدد مولات المذيب والتي هي مساوية تقريباً لـ  $(n_A + n_B)$  لتعطي :

$$(n_A V_A) \pi = n_A x_B RT \dots\dots\dots(10-96)$$

$$= n_A \frac{n_B}{n_A + n_B} RT$$

$$\approx n_B RT \dots\dots\dots(10-97)$$

واذا ادخل  $V$  بدلاً من  $n_A V_A$  والذي يمثل حجم المحلول الذي يحوي على

$n_B$  مول من المذاب فيمكن كتابة المعادلة (10-97) بالشكل التالي :

$$\pi V = n_B RT \dots\dots\dots(10-98)$$

امثلة محلولة :

في احدى التجارب العملية لقياس الضغط البخاري لسائل وزنه الجزيئي

164.39 وعند درجة حرارة  $35^\circ\text{C}$  وجد بان في حالة تبخر 0.92 غم من السائل

تكون قيمة الضغط البخاري للنظام المستخدم مساوية الى  $97459 \text{ Nm}^{-2}$  نتيجة

لامرار حجم من الهواء مقداره 2151 ml ، فكم تبلغ قيمة الضغط البخاري للسائل المذكور . ؟ افرض ان الهواء المشبع ببخار السائل يخضع الى معادلة الغازات المثالية .

الحل :

الكسر المولي لبخار السائل بوجود الهواء  $x_1$  يكون

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$$

حيث  $n_1$  و  $n_2$  يمثلان عدد مولات بخار السائل والهواء على التوالي .

$$x_1 = \frac{0.92 / 164.39}{0.92 / 164.39 + (1 \times 2.15 / 0.082 \times 308.16)} = 0.0617$$

$$p_i = x_i P_t$$

$$= 0.0617 \times 97459 = 6016 \text{ Nm}^{-2}$$

مثال :

من المعلومات المدرجة ، اوجد قابلية ذوبان حامض البنزويك في الكحول الايثيلي عند درجة  $27^\circ\text{C}$  على فرض ان المحلول يعتبر مثالياً .

المعلومات المتوفرة :

بالنسبة لحامض البنزويك : درجة الانصهار = 122 و  $\Delta H_f = 16.73$  الكحول الايثيلي ينجمد عند  $-114^\circ\text{C}$  وحرارة الانصهار للكحول  $H_f = 8.3$  ك . جول . مول<sup>-1</sup> .

الحل :

$$\ln x_s = -\frac{\Delta H_f}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]$$

$$\ln x_s = -\frac{16730}{8.3} \left[ \frac{395 - 300}{300 \times 395} \right]$$



$$= - \frac{167.3 \times 95}{8.314 \times 1185} = - 1.614$$

$$x = 0.1994$$

تمثل هذه القيمة قابلية ذوبان حامض البنزيك في الكحول الايثيلي عند تلك الدرجة 27 .

### مسائل الفصل العاشر

- 1 — احسب  $\Delta G$  و  $\Delta S$  لتكوين كمية من الهواء الحاوي على 1 مول من الغاز بمزج النتروجين والاكسجين عند درجة 298.15 K يمكن اعتبار الهواء حاوياً على 80% من النتروجين و 20% من الاكسجين حجماً  
(ج :  $\Delta G_{\text{mix}} = -1239 \text{ J mol}^{-1}$ )  
(ج :  $\Delta S_{\text{mix}} = 4.159 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )

- 2 — محلول من الكحول الايثيلي والماء في درجة 20°C له كسر مولي بالنسبة للكحول الايثيلي مقداره 0.2. وان الحجم المولاري الجزئي للماء هو 17.9 بوحدة  $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$  والحجم المولاري الجزئي النقي والماء النقي. اللازمين لعمل لتر من هذا المحلول. علماً ان كثافة الكحول الايثيلي تساوي 0.789 غم/سم<sup>3</sup>. وكثافة الماء 0.998 غم/سم<sup>3</sup>، وعلماً بان هاتين الكثافتين مأخوذتان في درجة 20°.

$$( \text{ج : حجم الكحول} = 461 \text{ cm}^3 \text{ وحجم الماء} = 570 \text{ cm}^3 )$$

- 3 — البنزين والتولين يكونان محلول يقترب من المثالية. ماهي القيمة المطلقة للانثروبي والحرارة القياسية والطاقة الحرة لتكوين 1 مول من محلول في درجة 25° وضغط 1 جو يحتوي على 0.3 مول من البنزين و 0.7 مول من التولين.

- 4 — ماهي قيم كل من  $\Delta G_{\text{mix}}$  ,  $\Delta S_{\text{mix}}$  ,  $\Delta H_{\text{mix}}$  ,  $\Delta V_{\text{mix}}$  لتكوين محلول بمزج نصف مول من محلول مثالي ثنائي المكون ومتساوي المولات مع نصف مول من احد مكونات المحلول.

- 5 — ارتفعت درجة غليان البنزين من القيمة الاعتيادية 80.1 الى 82.4° باضافة

13.76 gm من مادة ثنائي الفينيل  $C_6H_5C_6H_5$  الى 100 غم منه . ماهو مقدار ثابت الارتفاع لدرجة الغليان وحرارة التبخر للبنزين اعتماداً على هذه القيم .

الجواب :  $\Delta H_{vap} = 31 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

# الفصل الحادي عشر

## الدينامية الحرارية الاحصائي

### 1.11 الدينامية الحرارية الاحصائي Statistical Thermodynamics

ان اهمية الاحصاء بالنسبة الى الكيميائي هي علاقته مع بعض مواضيع الدينامية الحرارية. خاصة القانون الثاني والثالث. وان انسب طريقة لدراسة هذا الموضوع هي من خلال فكرة الانتروبي، ففي علم الدينامية الحرارية وعندما تكون المنظومة عند حجم ثابت، و طاقة ثابتة، في توازن، فان الانتروبي لها نهاية عظمى (maximum) ومن منطلق الميكانيك الاحصائي، فان مثل هذه المنظومة تكون في حالة توازن عندما تكون مجموع الاحتمالات لها نهاية عظمى.

يظهر وكما اقترح من قبل العالم بولتزمان بأن هناك علاقة بين الانتروبي والاحتمالية. تعرف الاحتمالية (الدينامية الحرارية) بأنها عدد الحالات المجهرية التي تعود لتلك الحالة الدينامية الحرارية وتعطى العلاقة بين الانتروبي والاحتمالية (W) بالمعادلة الاتية:

$$S = f(w)$$

ان طبيعة الدالة  $f(W)$  تعرف باعتبار منظومتين لهما قيمتين من الانتروبي  $S_1$ ، و  $S_2$  واحتماليتين  $W_1$  و  $W_2$  على التوالي.

وبما ان الانتروبي هو صفة شاملة (Extensive)، لذا فان  $S_{12}$  للمنظومتين المتحدتين يكون مساو  $S_1 + S_2$  وان الاحتمالية تكون  $W_{12}$  لهذه المنظومة وهي عبارة عن حاصل الضرب  $(W_1 \times W_2)$ .

$$S_{12} = S_1 + S_2 = f(W_1 \times W_2) \quad (a)$$

وتكون بالشكل المنفصل كما يلي :

$$S_1 = f(W_1) \quad , \quad S_2 = f(W_2)$$

وبالتعويض في المعادلة (a) نحصل على

$$f(W_1 \times W_2) = f(W_1) + f(W_2)$$

ولأجل ان تنطبق المعادلتان (a) و (b) لابد وان تكون قيمة S كالآتي :

$$S = k \ln W + \text{ثابت}$$

حيث k ثابت بولتيزمان ، ( ثابت الغاز لجزيئة واحدة )  $R/N$  . وقد افترض من قبل بلانك بأن الثابت الإضافي يمكن ان تكون قيمته مساوية الى الصفر لتكون المعادلة الأخيرة بالشكل التالي :

$$S = k \ln W$$

ولبدء بدراسة الموضوع هذا هناك طرق عديدة منها انه اذا اعتبرنا منظومة تحتوي على N من الجسيمات المتشابهة وغير المتفاعلة كحالة جزيئات غازية عند درجة حرارة T وحجم V ، وطاقة كلية قدرها E . في هذه المنظومة تكون لبعض الجزيئات طاقة تختلف عن معدل الطاقة  $E/N$  . ولكن اذا كانت كل جزيئة لها n من مستويات الطاقة المسموح بها ، لذلك فسوف يكون هناك توزيع للجسيمات خلال مستويات الطاقة المختلفة بحيث ان  $n_0$  من الجسيمات ربما يوجد في مستوى  $E_0$  و  $n_1$  في  $E_1$  ،  $n_2$  في  $E_2$  .. و  $n_n$  من الجسيمات في مستوى  $E_n$  مهما يكن التوزيع فان الشيء الحقيقي هو ان مجموع الجسيمات N ، يكون .

$$N = \sum n_i \quad \text{.....(11-1)}$$

وان مجموع الطاقة الكلية للمنظومة E

$$\sum n_i \epsilon_i = E \quad \text{.....(11-2)}$$

ان هناك عدة طرق توزيع فيها الجسيمات في المستويات المختلفة وتبقى على نفس الظروف المحددة للمعادلة (1-11) و (2-11). المهم في الوقت الحاضر هو عدد التوزيعات المحتملة. المسألة هنا تشبه عملية توزيع عدد  $N$  من الكرات على عدد  $n$  من الصناديق بحيث ان احد الصناديق يحوي  $n_0$  من الكرات، والثاني يحوي على  $n_1$  كرة وهكذا.

ان الجواب الرياضي لهذه المسألة :

$$W = \frac{N!}{n_0! n_1! n_2! \dots n_n!} \quad \text{.....(11-3)}$$

حيث  $W$  تمثل عدد الترتيبات المحتملة ، و  $N!$  تساوي  $(1 \times 2 \times 3 \times \dots \times N)$  ونفس الشيء بالنسبة للاعداد في المقام ، لذا فان في حالة  $N=6$  و  $n_0=1$  ، و  $n_1=2$  و  $n_2=3$  تكون :

$$W = \frac{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6}{1 \times (1 \times 2)(1 \times 2 \times 3)} = 6$$

يسمى المقد  $W$  بالاحتمالية الدينامية الحرارية للمنظومة ، وبأخذ لوغاريتم المعادلة (11-3) :

$$\begin{aligned} \ln W &= \ln N! - [\ln n_0! + \ln n_1! + \ln n_2! + \dots \ln n_n!] \\ &= \ln N! - \sum \ln n_i! \end{aligned} \quad \text{.....(11-4)}$$

وعندما يكون  $N$  عدد كبير كعدد افوكادور فيمكن ان يؤخذ  $\ln N$  حسب معادلة ستيرلنك التقريبية Stirlings formula .

$$\ln N! = N \ln N - N \quad \text{.....(11-5)}$$

ويطبق نفس الشيء على  $n_i$  باعتبارها كبيرة ايضاً ، لذا تكون كما يأتي :

$$\sum \ln n_i! = \sum n_i \ln n_i - \sum n_i \quad \text{.....(11-6)}$$

$$= \sum n_i \ln n_i - N$$

وبتعويض المعادلة (5-11) و (6-11) في المعادلة (4-11) نحصل على :

$$\ln W' = N \ln N - N - \sum n_i \ln n_i + N \quad \text{.....(11-7)}$$

$$= N \ln N - \sum n_i \ln n_i$$

## 2-11 التوزيع الاكثر احتمالاً The most probable Distribution

ان احذ الاسس في الميكانيك الاحصائي هو التوزيع الاكثر احتمالاً للجسيمات في المنظومة ، وعندما تأخذ  $W'$  قيمة قصوى . وفي هذه الحالة فان  $\delta W'$  وكذلك  $\delta \ln W'$  يجب ان تكون صفراً .

ويتطبيق هذا على المعادلة (7-11) تكون

$$\delta \ln W' = \delta \sum n_i \ln n_i = 0 \quad \text{.....(11-8)}$$

$$\sum (1 + \ln n_i) \delta n_i = 0$$

وبما ان  $N$  و  $E$  ثابتين ، فكذلك من الممكن الحصول من المعادلة (1-11) و (2-11) على المعادلتين :

$$\sum \delta n_i = 0 \quad \text{.....(11-9)}$$

$$\sum \epsilon_i \delta n_i = 0 \quad \text{.....(11-10)}$$

واذا ضربت المعادلتان (9-11) و (10-11) بالتعاقب بمعاملات غير محسوبة  $\alpha$  و  $\beta$  واضيفت الى المعادلة (8-11) نحصل مايلي :

$$\sum (\ln n_i + 1 + \alpha + \beta \epsilon_i) \delta n_i = 0 \quad \text{.....(11-11)}$$

$$\sum (\ln n_i + \alpha + \beta \epsilon_i) \delta n_i = 0$$

حيث

$$\alpha = \alpha' + 1$$

ولما كان كل من الطاقة الكلية للمنظومة E وعدد الجزيئات الكلي N ثابتاً فإن أي تغيير يقع هذه المنظومة قد يحصل في عدد جزيئات أحد المستويات مثل  $n_i$  وهذا يكون مشتملاً عن بقية الأعداد في المستويات الأخرى، ولا يحتاج أن يكون صفراً أي أن  $\delta n_i \neq 0$  وعليه لابد أن يكون كل حد ضمن علاقة الجمع مساوياً إلى صفر في المعادلة (11-11) أي أن :

$$\ln n_i + \alpha + \beta \epsilon_i = 0$$

ويكون عدد الجزيئات في المستوى :

$$n_i = e^{-\alpha} \cdot e^{-\beta \epsilon_i} \quad \dots\dots\dots(11-12)$$

ولكي نحصل على  $e^{-\alpha}$  يمكن إجراء عملية الجمع لطرفي المعادلة (12-11) وعندئذ ستكون النتيجة مساوية للمعادلة (11-11) كما مبينة :

$$N = \sum n_i = e^{-\alpha} \sum e^{-\beta \epsilon_i}$$

وتكون قيمة  $e^{-\alpha}$

$$e^{-\alpha} = \frac{N}{\sum e^{-\beta \epsilon_i}} \quad \dots\dots\dots(11-13)$$

وبما أن معدل الطاقة وفق النظرية الحركية للجزيئات لكل درجة حرية واحدة يساوي  $1/2 \beta$  أيضاً فاذن ستكون  $\beta$  كما يلي :

$$\beta = \frac{1}{kT} \quad \dots\dots\dots(11-14)$$

حيث k ثابت بولتزمان . وبإدخال المعادلة (13-11) و (14-11) في

المعادلة (12-11) نحصل على :

$$n_i = \frac{N e^{-\epsilon_i/kT}}{\sum e^{-\epsilon_i/kT}}$$

او

$$\frac{n_i}{N} = \frac{e^{-E_i/kT}}{\sum e^{-\epsilon_i/kT}} \quad \text{.....(11-15)}$$

ان المعادلة (11-15) تحتاج الى تحويل بسيط لتصبح معادلة عامة ، وان كل المعادلات انفة الذكر بنيت على اساس ان مستويات الطاقة غير منحلة ، وطالما هناك احتمال وجود مستويات طاقة منحلة ، فعليه يمكن ان يكون لكل مستوى طاقة وزن احصائي  $g_i$  لصبح المعادلة (11-15) بالشكل الاتي :

$$\frac{n_i}{N} = \frac{g_i e^{-\epsilon_i/kT}}{\sum g_i e^{-\epsilon_i/kT}} \quad \text{.....(11-16a)}$$

$$= \frac{g_i e^{-\epsilon_i/kT}}{O} \quad \text{.....(11-16b)}$$

حيث

$$Q = \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-17)}$$

وتدعى Q بدالة التجزئة partition function .

تعرف المعادلة (11-16) /بقانون بولتزمان للتوزيع وتعطى في اية درجة حرارة T كسر العدد الكلي للجسيمات في منظومة تحوي فيها الحالة الاكثر احتمالاً او في حالة التوازن تحوي طاقة  $E_i$  . لذا فان هذه المعادلة تعبر عن التوزيع الاكثر احتمالاً للجسيمات في المنظومة بين كل مستويات الطاقة المسموحة .

### 3-11 دالة التجزئة The partition Function

اذا طبقنا المعادلة (11-16) على عدد من الجسيمات  $n_i$  في المستوى i وعلى عدد من الجسيمات في المستوى الارضي  $E_0$  مع الابقاء على المقام بدون تغيير وقسمنا المعادلة في الحالة  $E_i$  على نظيرتها في الحالة الثانية  $E_0$  نحصل على النسبة :



$$\frac{n_i}{n_o} = \frac{g_i e^{-\epsilon_i/kT}}{g_o e^{-\epsilon_o/kT}}$$

حيث  $E_o$  طاقة المستوى الارضي و  $n_o$  عدد الجسيمات فيه ويمكن ان تكون :

$$= \frac{g_i e^{-(\epsilon_i - \epsilon_o)/kT}}{g_o} \quad \dots\dots\dots(11-18)$$

ولأجل الحسابات فانه من الممكن ان نعتبر  $\epsilon_o = 0$  ونأخذ كل قيم  $\epsilon_i$  نسبة الى الحالة الاساس . وعلى هذه الاساس فان المعادلة (18-11) تصبح :

$$n_i = \frac{n_o}{g_o} g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-19)$$

وبالتعويض في المعادلة (1-11) نحصل على  $N$  :

$$\begin{aligned} N &= \frac{n_o}{g_o} g_o + \frac{n_o}{g_o} g_1 e^{-\epsilon_1/kT} + \frac{n_o}{g_o} g_2 e^{-\epsilon_2/kT} + \dots \\ &= \frac{n_o}{g_o} (g_o + g_1 e^{-\epsilon_1/kT} + g_2 e^{-\epsilon_2/kT} + \dots) \\ &= \frac{n_o}{g_o} \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT} \\ &= \frac{n_o}{g_o} Q \quad \dots\dots\dots(11-20) \end{aligned}$$

ومن الممكن ان نعبر عن الصفات الدينامية الحرارية للمنظومة بدلالة  $Q$

$$(\partial^2 \ln Q / \partial T^2)_v, \quad (\partial \ln Q / \partial T)_v \quad \text{والمشتق}$$

من مشتق المعادلة (17-11) يكون من الممكن ان نحصل على :

$$\left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right)_v = \frac{1}{T} \left( \frac{Q}{Q} \right) \quad \dots\dots\dots(11-21)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \ln Q}{\partial T^2}\right)_v = \frac{1}{T^2} \left[ \left(\frac{Q''}{Q}\right) - \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 - 2 \left(\frac{Q'}{Q}\right) \right]$$

حيث

$$Q' = \sum g_i \left(\frac{\epsilon_i}{kT}\right) e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-23)$$

$$Q'' = \sum g_i \left(\frac{\epsilon_i}{kT}\right)^2 e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-24)$$

وعند الضرورة فانه من الممكن ان نحصل على  $Q$  ومشتقاتها من المجموع المؤشر في (11-17)، (11-23) و (11-24).

#### 4-11 طاقة المنظومة The Energy of System

إذا اعتبرنا  $E$  هي الطاقة الكلية للمجموعة وان  $E_0$  هي طاقة الحالة الأساس فيكون :

$$E - E_0 = \sum n_i \epsilon_i \quad \dots\dots\dots(11-25)$$

حيث  $n_i$  تمثل عدد الجسيمات الموجودة في مستوى الطاقة  $E_i$  نسبة الى الحالة الأساس وان المجموع هو نسبة الى كل حالات الطاقة الموجودة . ومن المعادلتين (11-19) و (11-20) نحصل على :

$$n_i = \frac{N}{Q} g_i e^{-\epsilon_i/kT}$$

وان المعادلة (11-25)

$$\begin{aligned} E - E_0 &= \frac{N}{Q} \sum g_i \epsilon_i e^{-\epsilon_i/kT} \\ &= \frac{NkT}{Q} \sum g_i \left(\frac{\epsilon_i}{kT}\right) e^{-\epsilon_i/kT} \end{aligned}$$

$$= NkT \left( \frac{Q}{Q} \right) \dots\dots\dots(11-26)$$

وان المعادلة (11-21) تبين ان

$$Q'/Q = T \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right)_v$$

وبالتالي فان :

$$|E - E_o = RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right)_v \dots\dots\dots(11-27)$$

حيث عوض عن R ب kN .

## 5-11 فصل دوال التجزئة

### Seperation of the partition Functions

بالنسبة للمنظومات المشتملة على جسيمات غير متفاعلة فان الطاقة الكلية للمنظومة يمكن كتابتها كمجموع للطاقة الانتقالية، الدورانية، الاهتزازية والالكترونية اي:

$$E = E_t + E_r + E_v + E_e \dots\dots\dots(11-28)$$

وباستعمال المعادلة (11-27) للتعبير عن كل شكل من اشكال الطاقة :

$$E_t - E_o = RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q_t}{\partial T} \right)_v \dots\dots\dots(11-29)$$

$$E_r - E_{o(v)} = RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q_r}{\partial T} \right) \dots\dots\dots(11-30)$$

$$E_v - E_{o(v)} = RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q_v}{\partial T} \right)_v \dots\dots\dots(11-31)$$

$$E_e - E_{o(e)} = RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q_e}{\partial T} \right)_v \dots\dots\dots(11-32)$$

حيث  $Q_e$ ،  $Q_v$ ،  $Q_r$ ،  $Q_t$  هي دوال التجزئة لكل من الطاقة الانتقالية، الدورانية، الاهتزازية، الالكترونية. **وبتمريض** المعادلة (11-27) في E والمعادلات اعلاه لكل انواع الطاقة نحصل:

$$\begin{aligned} E_o + RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right)_v &= [ E_{o(t)} + E_{o(r)} + E_{o(v)} + E_{o(e)} ] \\ &+ RT^2 \left[ \left( \frac{\partial \ln Q_t}{\partial T} \right)_v + \left( \frac{\partial \ln Q_v}{\partial T} \right)_v + \left( \frac{\partial \ln Q_r}{\partial T} \right)_v + \left( \frac{\partial \ln Q_e}{\partial T} \right)_v \right] \\ &= E_o + RT^2 \left[ \frac{\partial \ln (Q_t Q_r Q_v Q_e)}{\partial T} \right]_v \end{aligned}$$

وبذلك يكون

$$= Q_t Q_r Q_v Q_e \quad \text{.....(11-33)}$$

تعطي معادلة التوزيع القياسية عدد الجزيئات  $n_i$  التي لها طاقة كلية في المدى  $\epsilon_i$  و  $\epsilon_i + \delta\epsilon_i$  وهي:

$$n_i = \frac{g_i}{\alpha_e + \epsilon_i/kT} = \frac{g_i}{B} e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-34)}$$

حيث

$$e^\alpha = \beta = \frac{g_i}{n_i} e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-35)}$$

ان مجموع قيم  $n_i$  تساوي مجموع اعداد الجزيئات n

$$\begin{aligned} n &= \sum_i n_i = \frac{1}{\beta} \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT} \\ \therefore B &= \frac{1}{n} \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-36)} \end{aligned}$$

وان الكمية  $\sum g_i e^{-\epsilon_i/kT}$  والتي تمثل مجموع حدود  $g_i e^{-\epsilon_i/kT}$  لكل المستويات الكمية للطاقة لجزيئة واحدة، يشار لها بدالة التجزئة للجزيئة المعنية ويرمز لها بالرمز Q وتكون :

$$Q = \sum_i g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-37)$$

وان المعادلة (11-52)

$$e^\alpha = \beta = \frac{Q}{n}$$

## 6-11 الانتروبي والطاقة الحرة Entropy and Free Energy

ان العلاقة بين الانتروبي S ودالة الحالة M تعطى بالعلاقة :

$$S = k \ln M \quad \dots\dots\dots(11-38)$$

$$\ln M = \sum_i (n_i \ln g_i - n_i \ln n_i + n_i) \quad \dots\dots\dots(11-39)$$

$$\therefore S = k \sum_i (n_i \ln g_i - n_i \ln n_i + n_i)$$

وباستعمال قانون التوزيع التقليدي :

$$n_i = \frac{g_i}{e^{\alpha + \epsilon_i/kT}} \quad \dots\dots\dots(11-40)$$

و

$$E = \sum_i n_i \epsilon_i$$

$$S = \frac{E}{T} + k n \alpha + k n \quad \dots\dots\dots(11-41)$$

$$= \frac{E}{T} + R \alpha + R \quad \dots\dots\dots(11-42)$$

ولمنظومة مكونة من N جزيئة يمكن ان تكتب المعادلة (11-28) بالشكل الاتي

$$e^{\alpha} = \frac{Q}{N} \quad \text{.....(11-43)}$$

حيث Q هي دالة بالتجزئة لجزيئة واحدة . وتكون  $\alpha$  :

$$\alpha = \ln \frac{Q}{N} \quad \text{.....(11-44)}$$

ويمكن ان نعبر عن S في المعادلة (11-34) كما يلي :

$$S = \frac{E}{T} + R \ln \frac{Q}{N} + R \quad \text{.....(11-45)}$$

$$G = E + RT - TS$$

ومن المعادلة (11-37)

$$G = -RT \ln \frac{Q}{N} \quad \text{.....(11-46)}$$

وباستعمال المعادلة :

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S$$

وبالتعويض في المعادلة (11-37) نحصل على :

$$S = R \left[ \ln \frac{Q}{N} + T \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right)_p \right] \quad \text{.....(11-47)}$$

$$A = G - RT$$

لمول احد من غاز مثالي وبلاستعانة بالمعادلة (11-38) نحصل على

$$A = -RT \ln \frac{Q}{N} - RT \quad \text{.....(11-48)}$$

وباستعمال تقريب ستيرلنك لـ  $\ln N$  نحصل على :

$$A = -kT \ln \frac{QN}{N!} \quad \text{.....(11-49)}$$

وباستعمال معادلة الدينامية الحرارية المناسبة :

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_v = -S$$

نحصل على معادلة اخرى لاعطاء قيمة للانتروني :

$$S = k \ln \frac{QN}{N!} + RT \left(\frac{\partial \ln Q}{\partial T}\right)_v \quad \dots\dots\dots(11-50)$$

## 7-11 الطاقة والسعة الحرارية Energy and Heat Capacity

ان قيمة الطاقة الكلية يمكن ان تمثل بالدينامية الحرارية بالمعادلة الاتية :

$$E = A + TS$$

وباستعمال المعادلتين (41-11) و (42-11) لكل من A و S نحصل على :

$$E = RT^2 \left(\frac{\partial \ln Q}{\partial T}\right)_v \quad \dots\dots\dots(11-51)$$

ويمكن ان نكتب هذه المعادلة على الشكل الاتي :

$$E = \frac{RT^2}{Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v \quad \dots\dots\dots(11-52)$$

$$= -R \left\{ \frac{\partial \ln Q}{\partial (1/T)} \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-53)$$

$$= -\frac{R}{Q} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial (1/T)} \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-54)$$

واذا عرفنا الكمية Q

$$Q' = \left\{ \frac{\partial Q}{\partial (1/T)} \right\}_v = -T^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v \quad \dots\dots\dots(11-55)$$

وباستعمال تعريف Q من المعادلة (27-11) ينتج

$$Q' = - \sum_i \frac{\epsilon_i}{k} g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-56)$$

لذا فان المعادلة (46-11) يصبح :

$$E = - \frac{R}{Q} \quad \dots\dots\dots(11-57)$$

ان السعة الحرارية عند حجم ثابت يمكن الحصول عليها من تفاضل E بالنسبة لدرجة الحرارة عند ضغط ثابت وينتج

$$C_v = \frac{\partial}{\partial T} \left\{ RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right) \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-58)$$

$$= -R \frac{\partial}{\partial T} \left\{ \frac{\partial \ln Q}{\partial (1/T)} \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-59)$$

$$= \frac{R}{T^2} \left\{ \frac{\partial^2 \ln Q}{\partial (1/T)^2} \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-60)$$

واذا عرفنا Q بالطريقة التالية :

$$Q'' = \left\{ \frac{\partial^2 Q}{\partial (1/T)^2} \right\}_v \quad \dots\dots\dots(11-61)$$

$$= \sum_i \left( \frac{\epsilon_i}{k} \right)^2 g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-62)$$

ولذلك فان المعادلة (52-11) يمكن ان تكتب بالشكل الاتي :

$$C_v = \frac{R}{T^2} \left\{ \frac{Q''}{Q} - \left( \frac{Q'}{Q} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots(11-63)$$

$$H = E + RT$$

$$H = G + TS$$



ومن المعادلتين (11-39) نحصل على :

$$H = RT^2 \left( \frac{\partial^2 \ln Q}{\partial T^2} \right)_p \quad \text{.....(11-64)}$$

وبالتفاضل النسبة لدرجة الحرارة عند ثبوت الضغط نحصل :

$$C_v = \frac{\partial}{\partial T} \left\{ RT^2 \left( \frac{\partial \ln Q}{\partial T} \right) \right\}_p \quad \text{.....(11-65)}$$

## 8-11 تأثير مستوى الطاقة الصفر Effect of Zero Energy Level

بما ان دالة التجزئة تشمل مجموع عدد من الحدود الاسية الحاوية على الطاقات للمستويات الممكنة في الجزيئة، فان من الضروري اعتبار المستوى الذي سيؤخذ كمستوى الطاقة الصفر للغازات بصورة عامة يؤخذ مستوى الطاقة الصفر لكل جزيئة، اي ان المستوى الذي تكون اعداد كم الانتقال والاهتزاز والدوران مساوية للصفر، هي مستويات الطاقة الصفر. انه من المهم ان نلاحظ تأثير تغير الطاقة الصفر الى اي مستوى اخر. افترض ان  $\epsilon_i$  هي طاقة المستوى وتحسب اعتباراً من مستوى النقطة — صفر للجزيئة. وبما ان التجزئة تعطى بالطريقة المعتادة :

$$Q = \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT}$$

افترض الان ان الطاقة صفر تغيرت بمقدار  $\epsilon_0$  ، لذا فان قيمة الطاقة لكل مستوى تتغير بمقدار متساوي، لذلك فان دالة التجزئة الجديدة  $Q_{E_0}$  تعطى بالشكل التالي :

$$\begin{aligned} Q_{E_0} &= \sum g_i e^{-(\epsilon_0 + \epsilon_i)/kT} \\ &= e^{-\epsilon_0/kT} \sum g_i e^{-\epsilon_i/kT} \\ &= e^{-\epsilon_0/kT} Q \end{aligned} \quad \text{.....(11-66)}$$

- ان دالة التجزئة الجديدة تكون مساوية الى القيمة الاصلية مضروبة بـ  $e^{-\epsilon_0/kT}$  حيث  $\epsilon_0$  تمثل التغير في الطاقة الصفر لكل جزيئة.

إذا كانت  $E_0$  هي التغير الطاقة للمول الواحد والذي يساوي  $Ne_0$  حيث  $N$  يمثل عدد افوكادور ، فإن المعادلة (11-57) تصبح :

$$Q_{E_0} = e^{-E_0/RT} Q \quad \dots\dots\dots(11-67)$$

ويأخذ لوغاريث هذه المعادلة نحصل على :

$$\ln Q_{E_0} = \ln Q - \frac{E_0}{RT} \quad \dots\dots\dots(11-68)$$

$$\frac{\partial \ln Q_{E_0}}{\partial T} = \frac{\partial \ln Q}{\partial T} + \frac{E_0}{RT^2} \quad \dots\dots\dots(11-69)$$

ومن هذه المعادلات والأخذ بنظر الاعتبار دوال الطاقة المختلفة  $G$  ،  $E$  ،  $H$  ،  $A$  ، فإن من الممكن ملاحظة ان قيم هذه الدوال اعتماداً على الطاقة الصفر الجديدة ، ستكون  $E_0$  لكل مول اكبر من تلك التي اخذت على اساس مستوى الصفر الاصلي .

## 11-9 فصل دوال التجزئة لدرجات الحرية المختلفة

لغرض حساب دوال التجزئة فانه من المناسب فصل طاقة الجزيئة الى مالا يقل عن جزئين مستقلين ، احدهما ، الطاقة الانتقالية والذي يحسب بالاحداثيات ، عزوم مراكز الكتلة للجزيئة ، بينما الجزء الاخر يعتمد على كل درجات الحرية المتبقية ، اذا كان  $\epsilon_t$  يمثل الطاقة الانتقالية للجزيئة في اية حالة و  $\epsilon_i$  هي كل الطاقة المتبقية ، المستلمة على الدورانية ، الاهتزازية ، الالكترونية والاشكال النووية ، فإن  $E$  سوف تكون :

$$E = \epsilon_t + \epsilon_i$$

ولذلك فإن :

$$e^{-E/kT} = e^{-\epsilon_t/kT} e^{-\epsilon_i/kT} \quad \dots\dots\dots(11-70)$$

ان دالة التجزئة الكاملة للجزيئة سوف تنقسم الى قسمين ، عدد الدوال الذاتية ( الوزن الاحصائي )  $g$  للمنظومة سوف يكون مساوياً لحاصل ضرب الدوال الذاتية للاشكال المختلفة للطاقة ، لذا فان المعادلة (11-90) سوف تكون :

$$Q = \sum_t g_t e^{-\epsilon_t/kT} \sum_i g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-71)}$$

$$Q = Q_t Q_i \quad \text{.....(11-72)}$$

حيث  $Q_t$  و  $Q_i$  تكون .

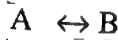
$$Q_t = \sum_t e^{-\epsilon_t/kT} \quad \text{.....(11-73)}$$

$$Q_i = \sum_i g_i e^{-\epsilon_i/kT} \quad \text{.....(11-74)}$$

لان  $g_t$  وهي الوزن الاحصائي لحالة الطاقة الانتقالية تساوي الواحد الصحيح .

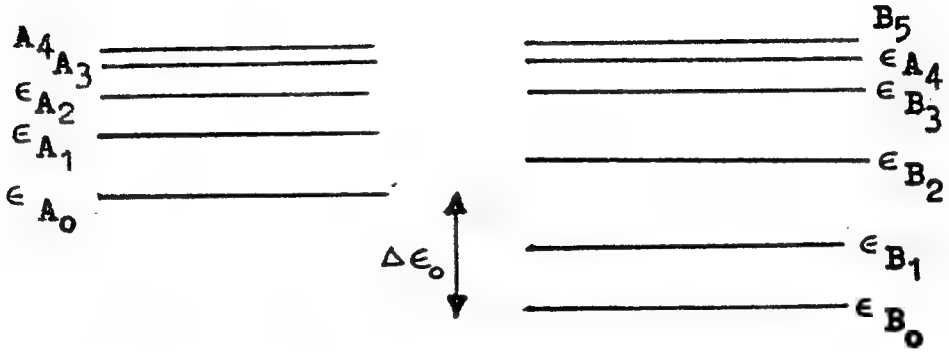
## 10-11 الطريقة النظرية لحساب ثابت التوازن :

بما ان الجزيئات تتوزع على مستويات طاقة مختلفة ، لذلك فان جزيئة معينة ربما تكون في اي من مستويات الطاقة هذه ، وبما ان التوازن يحدد او يعين اعتماداً على توزيع الجزيئات على هذه المستويات فكل مكونة من مكونات تفاعل ما في حالة توازن تكون لها مستويات طاقة خاصة بها . والمثال التالي يوضح ذلك :



حيث A المادة المتفاعلة و B المادة الناتجة .

يوضح الشكل التالي مستويات طاقة الجزيئات A و B :



فالجزيئات A و B في المستوى الأدنى من الطاقة لها فرق طاقى مقداره وفي هذه الحالة يكون التفاعل باعثاً للحرارة .

في حالة التوازن توزع الجزيئات نفسها بين كل مستويات الطاقة المتوفرة للمنظومة، اي بين كل مستويات طاقة A وبين كل مستويات طاقة الجزيئة B . يعرف ثابت التوازن بأنه النسبة بين مجموع الجزيئات في مختلف مستويات الطاقة المتوفرة لـ B الى مجموع الجزيئات في مختلف مستويات الطاقة المتوفرة لـ A . فاذا كان  $N_{A0}$  يمثل عدد الجزيئات من A في مستوى الطاقة الاولى، و  $N_{A1}$  يمثل عدد الجزيئات في مستوى الطاقة الاول، فان مجموع عدد الجزيئات  $N_A$  في مستويات الطاقة A هو :

$$N_A = N_{A_0} + N_{A_1} + N_{A_2} + \dots \quad \dots\dots\dots(11-75)$$

$$N_A = N_{A_0} + N_{A_0} e^{-\epsilon_{A_1}/kT} + N_{A_0} e^{-\epsilon_{A_2}/kT} \quad \dots\dots\dots(11-76)$$

$$= N_{A_0} \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{A_i}/kT} \quad \dots\dots\dots(11-77)$$

وبنفس الطريقة يكون مجموع عدد الجزيئات  $N_B$  في مستويات الطاقة B .

$$N_B = N_{B_0} \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{B_i}/kT} \quad \text{..... (11-78)}$$

وعند حجم ثابت

$$K_p = \frac{N_B}{N_A} = \frac{N_{B_0} \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{B_i}/kT}}{N_{A_0} \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{A_i}/kT}} \quad \text{.....(11-79)}$$

$$\frac{N_{B_0}}{N_{A_0}} = e^{-\Delta\epsilon_0/kT} \quad \text{.....(11-80)}$$

$$\therefore k_p = e^{-\Delta\epsilon_0/kT} \frac{\sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{B_i}/kT}}{\sum_{i=0}^{\infty} e^{-\epsilon_{A_i}/kT}} \quad \text{..... (11-81)}$$

يمكن حساب ثابت التوازن  $K_p$  لاي تفاعل اذا عرفت مستويات الطاقة للمواد الناتجة والمواد المتفاعلة وكذلك اذا عرفت  $\Delta\epsilon^\circ$  . لو تقارن ثابت التوازن المعطى لهذه المعادلة مع ثابت التوازن الذي يعتمد على تغير الانثالبي وتغير الانتروبي :

$$k_p = e^{+\frac{\Delta S^\circ}{R}} e^{-\frac{\Delta H^\circ}{RT}}$$

فان العامل  $e^{-\frac{\Delta\epsilon_0}{kT}}$  سيمثل عامل تغير الانثالبي الذي يرجع الناتج B اذا كانت  $\Delta\epsilon^\circ$  سالبة وتقل اهمية هذا العامل كلما ترتفع درجة الحرارة . اما العامل الثاني الذي هو نسبة دوال التجزئة فهو يرجع — الناتج اذا كانت مستويات الطاقة للناتج اوطأ من نظيرتها في المادة المتفاعلة . ويمكن اعتبارا هذا العامل بعامل الانتروبي او عامل الاحتمالية .

يمكن كتابة المعادلة (11-81) بدلالة دوال التجزئة الانتقالية والدورانية والاهتزازية والالكترونية للمواد الناتجة والمتفاعل بالشكل التالي :

$$k_p = \left(\frac{kT}{p}\right)^{\sum v_i} \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2 \sum v_i} \left(\prod_i m_i\right)^{v_i} \dots\dots\dots (11-82)$$

$$\prod_i (q_{rot_i})^{v_i} \prod_i (q_{vib})^{v_i} \prod_i (q_{elec_i})^{v_i} e^{-\Delta \epsilon_o / kT}$$

حيث يمثل المقدار

$$\left(\frac{kT}{p}\right)^{\sum v_i} \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2 \sum v_i} \left(\prod_i m_i\right)^{v_i}$$

دالة التجزئة للانتقال ، و P تمثل الضغط و  $m_i$  كتلة الجزيئة و  $h$  ثابت بلانك اما الرمز  $\prod_i$  فيمثل حاصل ضرب . اما فتمثل المعامل الستوكيوميتري في معادلة التفاعل .

اذا كانت المواد المتفاعلة والناتجة غير مثالية او سوائل فان قيمة  $K_p$  المحسوبة وفق المعادلة (11-102) لا يمكن ان تجزء بصورة مضبوطة قيمة الضغط او الكسر المولي للمواد المتفاعل في مزيج التوازن . ان ثابت التوازن الدينامي الحراري يعبر عنه بدلالة الفعاليات التابعة للمواد الناتجة والمتفاعلة — وهذه تعتمد على التأثيرات المتبادلة بين مكونات مزيج التفاعل ولذلك من الصعوبة بمكان معالجتها بصورة نظرية .

مثال (1) :

احسب درجة الحرارة التي عندها يكون 10% من جزيئات المنظومة موجودة في مستوى الطاقة الالكتروني الاول ، حيث الطاقة في هذا المستوى اكثر من الحالة الأساس :

$$\begin{aligned} \frac{n_i}{n} &= \frac{e^{-\epsilon_i / RT}}{\sum_i e^{-\epsilon_i / RT}} = \frac{e^{-\epsilon_1 / RT}}{e^{-\epsilon_o / RT} + e^{-\epsilon_1 / RT}} \\ &= \frac{1}{e^{\epsilon_1 / RT} + 1} \end{aligned}$$

$$0.1 = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon_1}{RT}}}$$

$$0.1 e^{\frac{\epsilon_1}{RT}} + 0.1 = 1 \rightarrow e^{\frac{\epsilon_1}{RT}} = \frac{0.9}{0.1} = 9$$

$$\frac{\epsilon_1}{RT} = \ln 9$$

$$T = \frac{\epsilon_1}{R \ln 9} = \frac{400}{8.3 \ln 9} = 2200 \text{ K}$$

مثال (2):

احسب قيمة الانتروبي بالطريقة الاحصائية لمادة CO الصلب عند درجة الصفر المطلق والنتاج عن العشوائية في توزيع جزيئات CO. على فرض ان نصف الجزيئات تأخذ الاتجاه CO والنصف الاخر يأخذ الاتجاه OC.

$$W = \frac{N!}{(N/2)! (N/2)!}$$

تقريب ستيرلنك

$$\ln N! = N \ln N - N$$

$$\ln W = \ln N! - \ln \frac{N}{2}! - \ln \frac{N}{2}!$$

$$= N \ln N - N - 2 \frac{N}{2} \ln \frac{N}{2} + 2 \frac{N}{2}$$

$$\ln W = N \ln 2$$

$$S = k \ln W = k N \ln 2 = \frac{R}{N} N \ln 2$$

$$= 8.3 \times 2.3 \times 0.3$$

$$= 5.76$$

## المصادر

1. S. Glasstone, Thermodynamics for chemists, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.
2. I. Klotz, Chemical Thermodynamics, W.A Benjamin, New York., 1964.
- 3-F. T. wall, Chemical Thermodynamics, 2nd. edition, W.H. Freeman, San Francisco, 1968.
4. J.G. Kirkwood and I. Oppenheim, Chemical Thermodynamics, McGraw - Hill, New York, 1961.
5. N. Lemis and M. Rendal, Thermodynamics, 2nd. ed. (revised by K. S. pitzer and L. Brewer), McGraw - Hill, New York, 1961.
6. S. H. Maron and J. B. Lando, Fundamentals of physical Chemistry, Macmillan publishing Co., Inc., New York, 1974.
7. E. J. Rosenbaum, physical Chemistry, Meredith corporation, New York, 1970.
8. P. W. Atkins, physical Chemistry, Oxford University press, Oxford, 1978.
9. B. H. Mahan, Elementary Chemical Thermodynamics, W. A. Benjamin, Inc., New York, 1964.
10. E.B. Smith, Basic Chemical Thermodynamics, 2nd Edition, Claredon press, Oxford, 1977.
11. J.W. Moncrief and W. H. Jones, Elements of physical Chemistry, Addison - Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1977.
12. W. J. Moore, physical Chemistry, 5th. Edition, Longman Group Limited, London, 1972.



13. J. P. Bromberg, Physical Chemistry, Allyn and Bacon, Inc. Boston, 1980.
14. G. I. Brown, Introduction to physical Chemistry, 3rd. Edition, Longman Group Limited, Essex, 1983.
15. F. Daniels and R. A. Alberty «Physical Chemistry» 4th edition, John Wiley and Son, New York, 1975.

## المصطلحات العلمية

### A

Adiabatic process	عملية كظمية
Adiabatic wall	جداراً كظمياً
Absolute tamperature	درجة الحرارة المطلقة
Activity	فعالية
Activity cofficient	معامل الفعالية
Anisotropic	متباين الخواص — غير منتظم الصدر
Amorphous	لا بلوري

### B

Basic convention	اصطلاحات اساسية
Boundaries	حدود
Bond dissociation energy	طاقة تفكك الاصرة
Body centered cubic	مكعب مركزي الجسم
Bond enthalyp	انثالبية الاصرة

### C

Closed system	المنظومة المغلقة
Chemical composition	التركيب الكيميائي
Chemical Equilibrium	توازن كيميائي
Cyclic process	عملية دورية
Celsius scale	مقياس سلسيس
Calorimeter	مسعر

Criteria of chemical equilibria

معايير التوازن الكيميائي

Chemical potential

الجهود الكيميائي

Critical state

الحالة الحرجة

Compressibility ratio

النسبة الانضغاطية

Crystal lattice

التركيب البلوري

Crystal forms

الاشكال البلورية

Covalent bond

الاصرة التساهمية

Crystal

بلورة

Crystal angle

زوايا البلورة

Crystal faces

اوجه البلورة

Crystal growth

تنمية البلورة

Crystallograpy

علم البلورات

Colligative properties

الخواص المترابطة

## D

Dependent variables

متغيرات معتمدة

Dipole-dipole interaction

تجاذب ثنائيات الاقطاب

Diffraction

حيود

Depression in the freezing point

الانخفاض في درجة الانجماد

Degenerate states

حالات منحلة

Degree of freedom

درجات الحرية

Degenerate energy

طاقة منحلة

Dimer

ثنائي الجزيئة

## E

Equilibrium state

حالة توازن

Extensive properties

خواص الاتساع

Electromotive force

القوة الدافعة الكهربائية

Endothermic reaction

تفاعل ممتص للحرارة

Exothermic reaction	تفاعل باعث للحرارة
Enthalpy of formation	انثالبية التكوين
Enthalpy of combuztion	انثالبية الاحتراق
Enthalpy of dilution	انثالبية التخفيف
Enthalpy of neutralization	انثالبية التعادل
Enthalpy of atomization	انثالبية التذرية
Entropy	انثروبي — اختلاج
Equation of state	معادلة الحالة
Entropy of vaporization	انثروبي التبخير
Entropy of mixing	انثروبي المزج — اختلاج المزج
Exact differential	تفاضل مضبوط
Elevation of boiling point	الارتفاع في درجة الغليان
Electrnic energy	الطاقة الالكترونية

## F

First law of thermodynamic	القانون الاول للدينامية الحرارية
Falling sphere method	طريقة الكرة الساقطة
Face centered cubic	مكعب مركزي الوجه
Freezing point	درجة الانجماد
Fugacity	فيوكاسيتي ، ضغط فعال

## G

Gibbs free energy	طاقة كينس الحرة
Gap saturation method	طريقة تشبع الغاز

## H

Homogeneous	متجانس
Heterogeneous	غير متجانس
Heat capacity	السعة الحرارية

Helmholtz free energy	طاقة همهولتز الحرة
Hydrogen bond	أصرة هيدروجينية
Hexagonal	سداسي الأوجه
Heat of reaction	حرارة التفاعل
Heat of combustion	حرارة الاحتراق
Heat of mixing	حرارة المزج
Henrey law	قانون هنري

## I

Interaction	تجاذب ، تأثير
Isolated system	المنطقة المعزولة
Independent variables	متغيرات مستقلة
Intensive properties	خواص الشدة
Isothermal process	عمليات ثابتة درجة الحرارة
Isochoric process	عمليات ثابتة الحجم
Isobaric process	عمليات ثابتة الضغط
Infinitesimal	متناهي الصغر
Irreversible process	عملية لا رجوعية
Indicator diagram	مخطط الدليل
Inexact differential	تفاضل غير مضبوط
Internal	الطاقة الداخلية
Inductive effect	عامل الحث
Isothermal compressibility	الانضغاط تحت درجة حرارة ثابتة
Isotropic	منتظم الصور — منتظم الخواص
Intermolecular interaction	تجاذب بين جزيئي
Intramolecular interaction	تجاذب ضمن جزيئي
Ionic bond	أصرة أيونية
Isomorphous	بلورة متشابهة
Imperfection	البلورة الناقصة — محبب البلورة

Indices	ادلة
Interface	سطح بيني
Ideal solution	محلول مثالي
Interaction forces	قوى تجاذب
Integral enthalpy of solution	الانثالبية التكاملية للمحلول

## L

Lattice morphology	علم الاشكال البلورية
London forces	قوى لندن
Lattice plane	مستوى البلورة
Law of rectilinear	قانون استقامة الاقطار
Lattice projection	اسقاط البلورة
Lattice	شبيكية
Lattice symmetry	تناظر البلورة
Liquid	سائل

## M

mechanisim	اليه
Metalic lattice	بلورة فلزية
Macroscopic properties	الصفات العيانية
Microscopic properties	الصفات المجهرية
Mechanical equilibrium	توازن ميكانيكي
Molar heat capacity	السعة الحرارية المولارية
Monoclinic	احادي الميل
Maximum work	الشغل الاعظم
Mechanical equivalent of heat	المكافئ الميكانيكي للحرارة
Miller indices	ادلة ملر
Mole fraction	الكسور المولية
Maximum	النهاية العظمى

Monomer	احادية الجزيئة
Minimum	النهاية الدنيا
Natural processes	عمليات طبيعية
Nonspontaneous processes	عمليات لا تلقائية
Number of components	عدد المكونات
Negative deviation	حيود سالب

## O

Orthorhombic	معيني
Osmotic pressure	الضغط الازموزي
Open system	منظومة مفتوحة
Osmosis	التنافذ
One component system	منظومة احادية التكوين

## P

Phase	طور
Physical properties	الخواص الفيزيائية
Perpetual motion	الحركة الابدية
Partial molar quantities	الكميات المولارية الجزيئية
Partial molar volume	الحجم المولاري الجزيئي
Positive deviation	حيود موجب
Pattern	نمط
Point lattice	نقطة شبكية
Positive hole	ثقب موجب
Probability	احتمالية
Polarization	استقطابية
Probable distribution	التوزيع الاحتمالي
Polymer	متعدد الجزيئات
Phase equilibria	توازنات الاطوار

Polymorphism  
Phase rule  
Partition function

شكل بلوري متعدد  
قاعدة الاطوار  
دالة التجزئة

## R

Reversible processes  
Reduced temperature  
Reduced pressure  
Reduced volume

عمليات رجوعية  
درجة الحرارة المختزلة  
الضغط المختزل  
الحجم المختزل  
قانون راؤولت  
انعكاس

Reflection

Real solution

Rotational energy

محلول حقيقي  
الطاقة الدورانية

## S

System

منظومة

Surrounding

محيط

State variables

متغيرات الحالة

State function

دوال الحالة

State equation

معادلة الحالة

Spontaneous processes

العمليات التلقائية

Second law of thermodynamic

القانون الثاني للدينامية الحرارية

Surface tension

الشدة السطحي

Solid state

الحالة الصلبة

Scattering

استطارة

Semi conductors

شبه موصل

Solution

محلول

Solute

مذاب

Solvent

مذيب

Statistical thermodynamic

الدينامية الحراري الاحصائي



## T

Thermodynamic	الدينامية الحرارية
Thermal equilibrium	توازن حراري
Thermodynamic process	عملية دينمية حرارية
Thermocouple	المزدوج الحراري
Third law of thermodynamic	القانون الثالث للدينامية الحرارية
Tetrahedral	رباعي الوجوه
Translational energy	الطاقة الانتقالية

## U

Unit cell	وحدة الخلية
-----------	-------------

## V

Virtual work	الشغل الافتراضي
Vapor pressure	الضغط البخاري
Viscosity	لزوجة
Volatile substance	مادة طيارة
Vapor pressure	الضغط البخاري

## W

Work	شغل
------	-----

## Z

Zero law of thermodynamic	القانون الصفر للدينامية الحرارية
---------------------------	----------------------------------

ملحق 1: الحجم المولية للغازات في  $M^3$  عند الظروف القياسية

Acetylene	0.022085	Ethylene	0.022246
Ammonia	0.022094	Helium	0.022396
Argon	0.022390	Hydrogen	0.022432
Carbon dioxide	0.022263	Methane	0.022377
Chlorine	0.022063	Nitrogen	0.022403
Ethane	0.022172	Oxygen	0.022392

ملحق 2: توزيع السرعة لجزيئات الغاز في 273.15 K

Gas	c(m S-1)	Gas	c(m S-1)
Ammonia	582.7	Helium	1204.0
Argon	380.8	Hydrogen	1692.0
Benzene	272.2	Mercury	170.0
Carbon monoxide	362.5	Methane	600.6
Chlorine	454.5	Nitrogen	454.2
Deuterium	1196.0	Water	566.5

ملحق 3: ثوابت فان ديرفال

Formula	Tc (K)	Pc (MPa)	$10^6 V_c$ ( $m^3 \text{ mol}^{-1}$ )	$10^3 a$ ( $m^6 \text{ Pa mol}^{-2}$ )	$10^6 b$ ( $m^3 \text{ mol}^{-1}$ )
He	5.3	0.229	61.6	3.45	23.7
H <sub>2</sub>	3.33	1.30	69.7	24.7	26.6
N <sub>2</sub>	126.1	3.39	90.0	141	39.1
CO	134.0	3.51	90.0	151	39.9
O <sub>2</sub>	154.3	5.04	74.4	138	31.8
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	282.9	5.16	127.5	453	57.1
CO <sub>2</sub>	304.2	7.38	94.2	364	42.7
NH <sub>3</sub>	405.6	11.37	72.0	422	37.1
H <sub>2</sub> O	647.2	22.06	55.44	553	30.5
Hg	1735.0	105.0	40.1	820	17.0

ملحق 4: الطاقة الاهتزازية والتوزيع لـ Cl<sub>2</sub> في درجات الحرارة 300 و 1000 K

T	energy	Total vibrational	Level populations as percent of total <sup>a</sup>				
			v=0	v=1	v=2	v=3	v=4
(K)	(J mol <sup>-1</sup> )						
300	3859	93	6	—	—	—	—
400	4390	87	11	1	—	—	—
500	5039	81	16	3	1	—	—
1000	7970	58	25	10	5	2	—

Round-off errors cause sums not exactly 100% Absence of an entry indicates a population less than 0.5%

ملحق 5: السعة الحرارية للغازات، عند ضغط  $P^\circ = 101.32 \text{ KP}_a$

$$C_p = a + bT + cT^2 \text{ (Cp in JK}^{-1} \text{ mol}^{-1})$$

Gas	a	b $\times 10^3$	c $\times 10^7$
H <sub>2</sub>	a	-0.836	20.1
O <sub>2</sub>	25.72	12.98	-38.6
Cl <sub>2</sub>	31.70	10.14	-2.72
Br <sub>2</sub>	35.24	4.075	-14.9
N <sub>2</sub>	27.30	5.23	-0.04
CO	26.86	6.97	-8.20
HCl	28.17	1.82	15.5
HBr	27.52	4.00	6.61
H <sub>2</sub> O	30.36	9.61	11.8
CO <sub>2</sub>	26.00	43.5	-148.3
Benzene	-1.17	326.0	-1100
n-Hexane	30.60	438.9	-1355
CH <sub>4</sub>	14.15	75.5	-180

ملحق 6: انثالبي الاصل (KJ mol<sup>-1</sup>)

	A	Si	I	Br	Cl	F	O	N	C	H
H	339	339	299	366	432	563	463	391	413	436
C	290	290	240	276	328	441	351	292	348	
N					200	270		161		
O		369			203	185	139			
F		541	258	237	254	153				
Cl	250	359	210	219	243					
I		213	151	193						
Si	227	177								
S	213									

ملحق 7: الضغط البخاري للسوائل  $\ln P(P_g) = A-B/T-C \ln T$

Liquid	A	B	C	Liquid	A	B	C
Ar	37.27	1.147	2.814	CH <sub>4</sub>	39.36	1.378	3.283
Na	31.23	13.290	1.178	CH <sub>3</sub> Cl	55.59	3.917	5.133
K	31.56	10.980	1.37	CHCl <sub>3</sub>	49.32	5.019	3.916
Zn	32.53	15.360	1.127	CF <sub>4</sub>	28.73	1.687	1.132
Hg	29.19	7.710	0.840	CCl <sub>4</sub>	50.88	5.856	5.669
Pb	32.76	25.100	1.05	CS <sub>2</sub>	41.56	4.247	2.90
N <sub>2</sub>	34.99	861	2.833	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	45.12	2.328	3.865
O <sub>2</sub>	39.25	1.147	3.334	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	42.09	2.430	3.332
Cl <sub>2</sub>	41.71	3.258	3.017	(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	49.93	5.074	3.966
Br <sub>2</sub>	40.88	4.603	2.661	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	50.67	3.982	4.376
HCN	30.41	3.687	1.148	CH <sub>3</sub> OH	56.55	6.128	4.634
H <sub>2</sub> O	60.32	6.851	5.138	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	52.84	5.501	4.779
NH <sub>3</sub>	45.70	3.714	3.406	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	74.20	4.933	7.978

8: تعاريف للمحاليل

Name	Symbol	Definition	Usual SI unit
Molality	m	Amount of solute in unit mass of solvent	mol kg <sup>-1</sup>
Concentration	c	Amount of solute in unit volume of solution	mol dm <sup>-3</sup>
Volume molality	m	Amount of solute in unit volume of solvent	mol dm <sup>-3</sup>
[Mass] percent	%	Mass of solute in 100 unit masses of solution	Dimensionless
Mole fraction	X <sub>A</sub>	Amount of component A divided components	Dimensionless

ملحق 9 : الضغط الازموزي لمحلول السكروز في الماء عند 20°C

Molality, m (mol kg <sup>-1</sup> )	Concen- tration, c (mol dm <sup>-3</sup> )	Observed osmotic pressure (kPa)	Calculated osmotic pressure (k Pa)		
			Eq.(9.36)	Eq.(9.40)	Eq.(9.38)
0.1	0.098	262	239	243	247
0.2	0.192	513	469	487	553
0.3	0.282	771	689	731	792
0.4	0.370	1027	902	975	1035
0.5	0.453	1292	1100	1220	1279
0.6	0.533	1559	1300	1460	1520
0.7	0.610	1837	1490	1700	1760
0.8	0.685	2119	1670	1945	2003
0.9	0.757	2403	1840	2190	2244
1.0	0.825	2693	2010	2430	2480

ملحق 10 : فعالية الماء ومحلول السكروز في محاليلها عند 323.2 K

Water			Sucrose	
Mole fraction X <sub>A</sub>	Vapor pressure (kPa)	Activity a <sub>A</sub>	Mole fraction X <sub>B</sub>	Activity a <sub>B</sub>
1.0000	12.333	1.0000	0.0000	0.0000
0.9940	12.258	0.9939	0.0060	0.0060
0.9864	12.252	0.9934	0.0136	0.0136
0.9826	12.085	0.9799	0.0174	0.0197
0.9762	11.959	0.9697	0.0238	0.0302
0.9665	11.863	0.9619	0.0335	0.0481
0.9559	11.588	0.9477	0.0441	0.0716
0.9439	11.468	0.9299	0.0561	0.1037
0.9323	11.153	0.9043	0.0677	0.1390
0.9098	10.801	0.8758	0.0902	0.2190
0.8911	10.539	0.8545	0.1089	0.3045

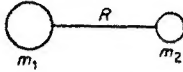
ملحق 11 : الفعالية المولالية لبعض الحوامض الامينية في 298 15 K

Compound	Molality, m					
	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0
Glycine	0.961	0.944	0.913	0.854	1.5	0.782
Alanine	1.005	1.007	1.012	1.024	1.027	—
Threonine	0.989	0.984	0.975	0.959	0.951	0.944
Proline	1.019	1.028	1.048	1.097	1.149	1.205
e-Aminocaproic acid	0.971	—	0.951	0.942	1.002	1.072
Glycylglycine	0.912	0.879	0.828	0.745	0.697	—
Glycylalanine	0.935	0.912	0.883	0.855	—	—

ملحق 12 : بعض القيم الدينامية الحرارية للمواد

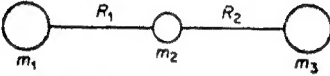
Substance	Normal melting point (K)	Enthalpy of melting ( $\text{kJmol}^{-1}$ )	Entropy of melting ( $\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}$ )	Normal boiling point (K)	Enthalpy of vaporization ( $\text{kJmol}^{-1}$ )	Entropy of vaporization ( $\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}$ )
Hg	234	2.43	10.4	1165	64.9	103
K	336	2.43	7.20	1047	91.6	87.5
Na	371	2.64	7.11	1165	103	88.3
Al	932	10.7	11.4	2740	283	103
Ag	1234	11.3	9.16	2485	290	117
Fe	1802	14.9	8.24	3273	404	123
Pi	2028	22.3	11.0	4100	523	128
NaCl	1073	30.2	28.1	1686	766	454
KCl	1043	26.8	25.7	1500	690	460
H <sub>2</sub>	14	0.12	8.4	20.7	0.92	44.4
Ar	83	1.17	14.1	87.5	7.87	89.9
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	156	4.60	29.7	351.7	43.5	124
NH <sub>3</sub>	198	7.70	38.9	240	29.9	125
H <sub>2</sub> O	273	5.98	22.0	373	47.3	126.8
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	278	9.83	35.4	353.3	34.7	98.2

1. Diatomic



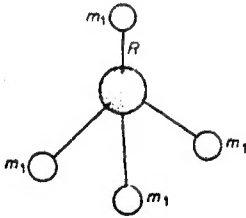
$$I = \mu R^2 \quad \mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$$

2. Linear triatomic



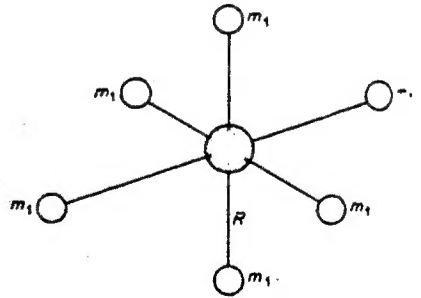
$$I = \frac{m_1 m_3 (R_1 + R_2)^2 + m_2 (m_1 R_1^2 + m_3 R_2^2)}{m_1 + m_2 + m_3}$$

3. Spherical tops

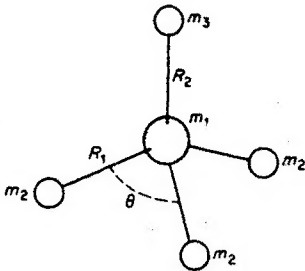


$$I = \frac{8}{3} m_1 R^2$$

$$I = 4 m_1 R^2$$



4. Symmetric tops



$$I_{\perp} = m_2 R_1^2 (1 - \cos \theta)$$

$$+ \frac{m_2}{m} (m_1 + m_3) R_1^2 (1 + 2 \cos \theta)$$

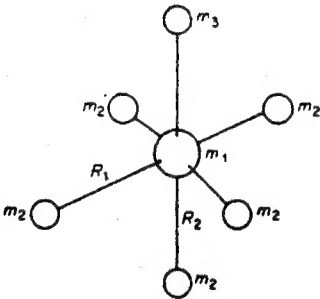
$$+ \frac{m_3}{m} R_2 \left[ (3m_2 + m_1) R_2 + 6m_2 R_1 \left( \frac{1 + 2 \cos \theta}{3} \right)^{1/2} \right]$$

$$m = m_1 + 3m_2 + m_3$$

$$I_{||} = 2m_2 R_1^2 (1 - \cos \theta)$$

$$I_{\perp} = 2m_2 R_1^2 + 2m_3 R_2^2$$

$$I_{||} = 4m_2 R_1^2$$





ملحق 14: الدوال الدينامية الحرارية المولارية للهزاز التوافقي ( وحدات الطاقة  $\text{mol}^{-1}$  )

$x = \frac{h\nu}{kT}$	$C_v$	$\frac{U-U_0}{T}$	$\frac{-(G-U_0)}{T}$	$x = \frac{h\nu}{kT}$	$C_v$	$\frac{U-U_0}{T}$	$\frac{-(G-U_0)}{T}$
0.10	8.305	7.912	19.56	1.70	6.573	3.159	1.677
0.15	8.297	7.707	16.39	1.80	6.393	2.958	1.502
0.20	8.289	7.510	14.20	1.90	6.209	2.778	1.347
0.25	8.272	7.318	12.55	2.00	6.021	2.603	1.209
0.30	8.251	7.130	11.23	2.20	5.640	2.279	0.976
0.35	8.230	6.945	10.14	2.40	5.255	1.991	0.7907
0.40	8.205	6.761	9.230	2.60	4.870	1.734	0.6418
0.45	8.176	6.586	8.439	2.80	4.494	1.507	0.5213
0.50	8.142	6.410	7.753	3.00	4.125	1.307	0.4246
0.60	8.071	6.067	6.615	3.50	3.270	0.9062	0.2552
0.70	7.983	5.740	5.708	4.00	2.528	0.6204	0.1535
0.80	7.883	5.427	4.962	4.50	1.913	0.4204	0.0933
0.90	7.774	5.125	4.339	5.00	1.420	0.2920	0.0556
1.00	7.657	4.841	3.816	5.50	1.036	0.1878	0.0338
1.10	7.523	4.565	3.366	6.00	0.7455	0.1238	0.0209
1.20	7.385	4.301	2.982	6.50	0.5296	0.0815	0.0125
1.30	7.234	4.049	2.645	7.00	0.3723	0.0531	0.0075
1.40	7.079	3.810	2.355	8.00	0.1786	0.0221	0.0025
1.60	6.745	3.365	1.875	10.00	0.0832	0.0092	0.0016

ملحق 15: درجات الحرارة الدورانية والاهتزازية المميزة

Molecule	$\Theta_r(K)$	$\Theta_r(K)$	Molecule	$\Theta_r(K)$	$\Theta_r(K)$
H <sub>2</sub>	85.3	6215	N <sub>2</sub>	2.88	3374
D <sub>2</sub>	42.7	4394	O <sub>2</sub>	2.07	2256
Cl <sub>2</sub>	0.351	808	HCl	15.02	4227
Br <sub>2</sub>	0.116	463	HBr	12.02	3787
I <sub>2</sub>	0.0537	308	HI	9.06	3266